PUC Minas

DIRETORIA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA

Pós Graduação *Lato Sensu*

Geração Distribuída com Energias Renováveis

Módulo Sistemas de Armazenamento e Célula a Combustível

Cláudio Homero Ferreira da Silva

Técnico em Eletrotécnica (EEU, 1999). Bacharel (2000), Mestre (2002) e Doutor (2009) em Engenharia Química pela UFU. Especialista em Formas Alternativas de Energia (UFLA, 2010). Licenciatura em Matemática (FIS, 2015). Possui também outras especializações, Aperfeiçoamento em Gerenciamento de Projetos e Certificação em Prince2.

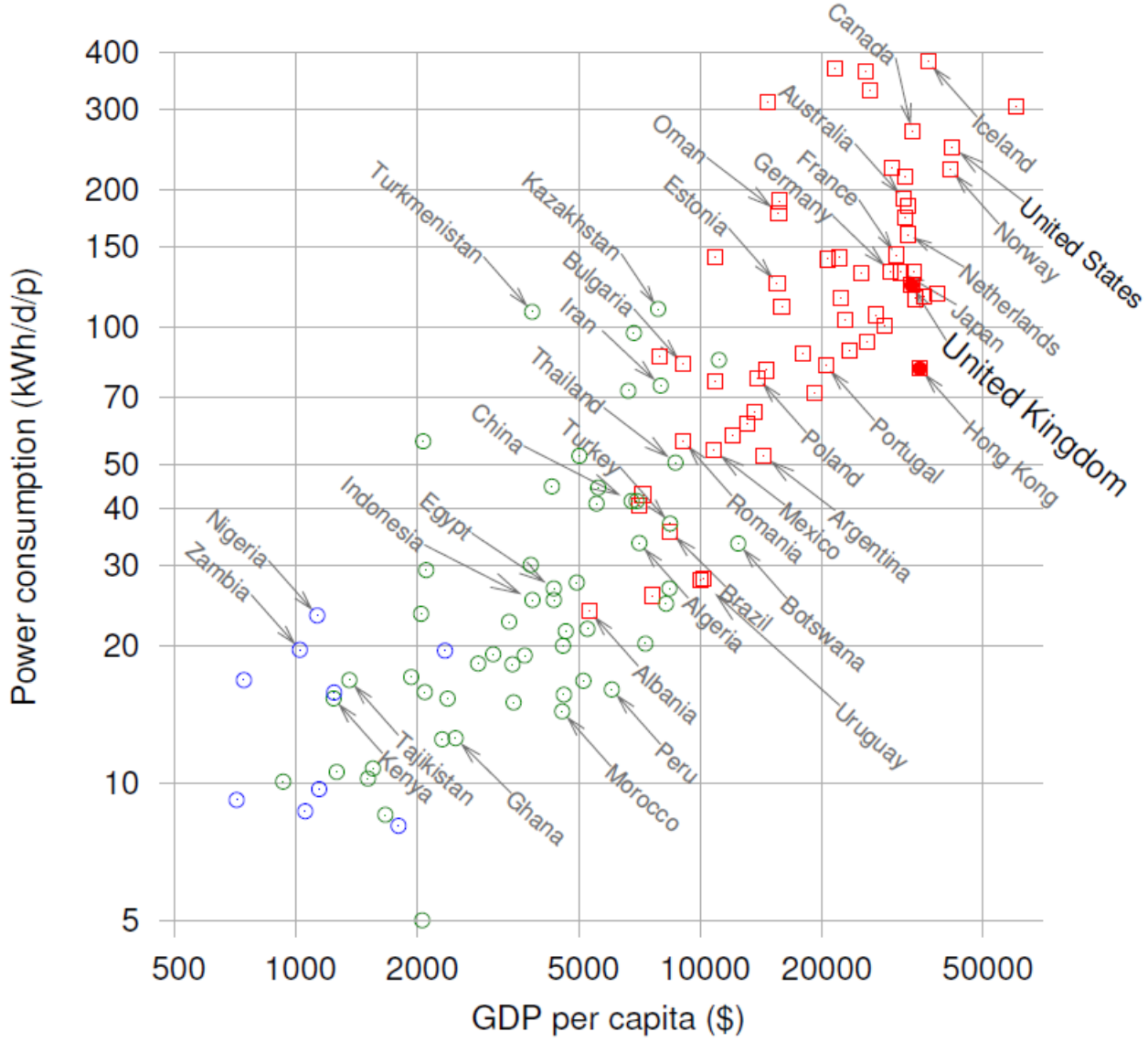
Empregado da Cemig a 30 anos. Atualmente é Gerente de "P&D", Inovação e Transformação. Tem experiência na área de alternativas energéticas, tendo participado de mais de 30 projetos de P&D. Seus temas recorrentes são: hidrogênio, célula a combustível, biomassa, resíduos, prospecção em energia.

Possui mais de 130 publicações em diversos fóruns e eventos, atuando também como revisor e comitê científico em diversas publicações.

Link para currículo Lattes: http://lattes.cnpq.br/2672329280870888

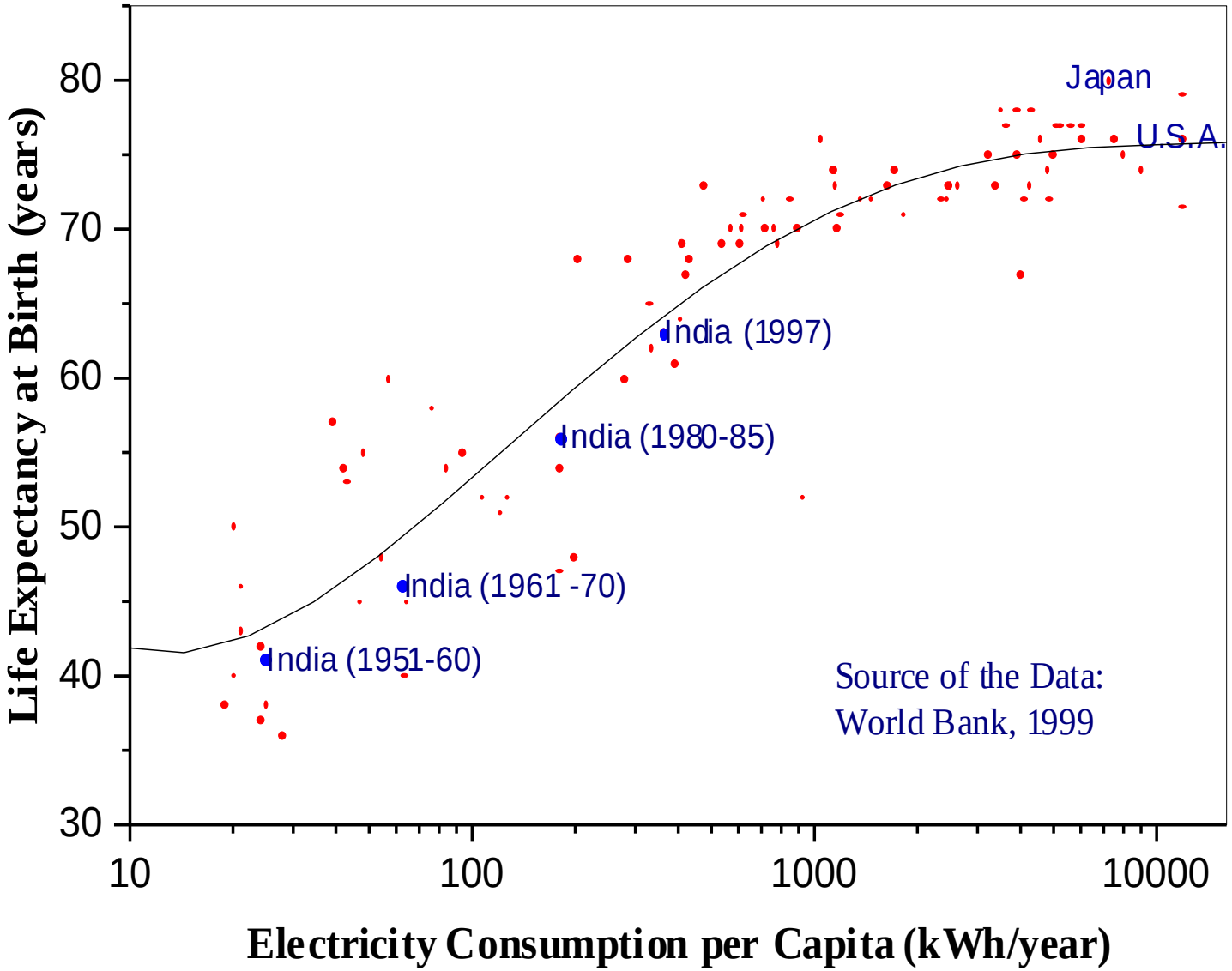
1. Contextualização

Energia e Desenvolvimento Econômico

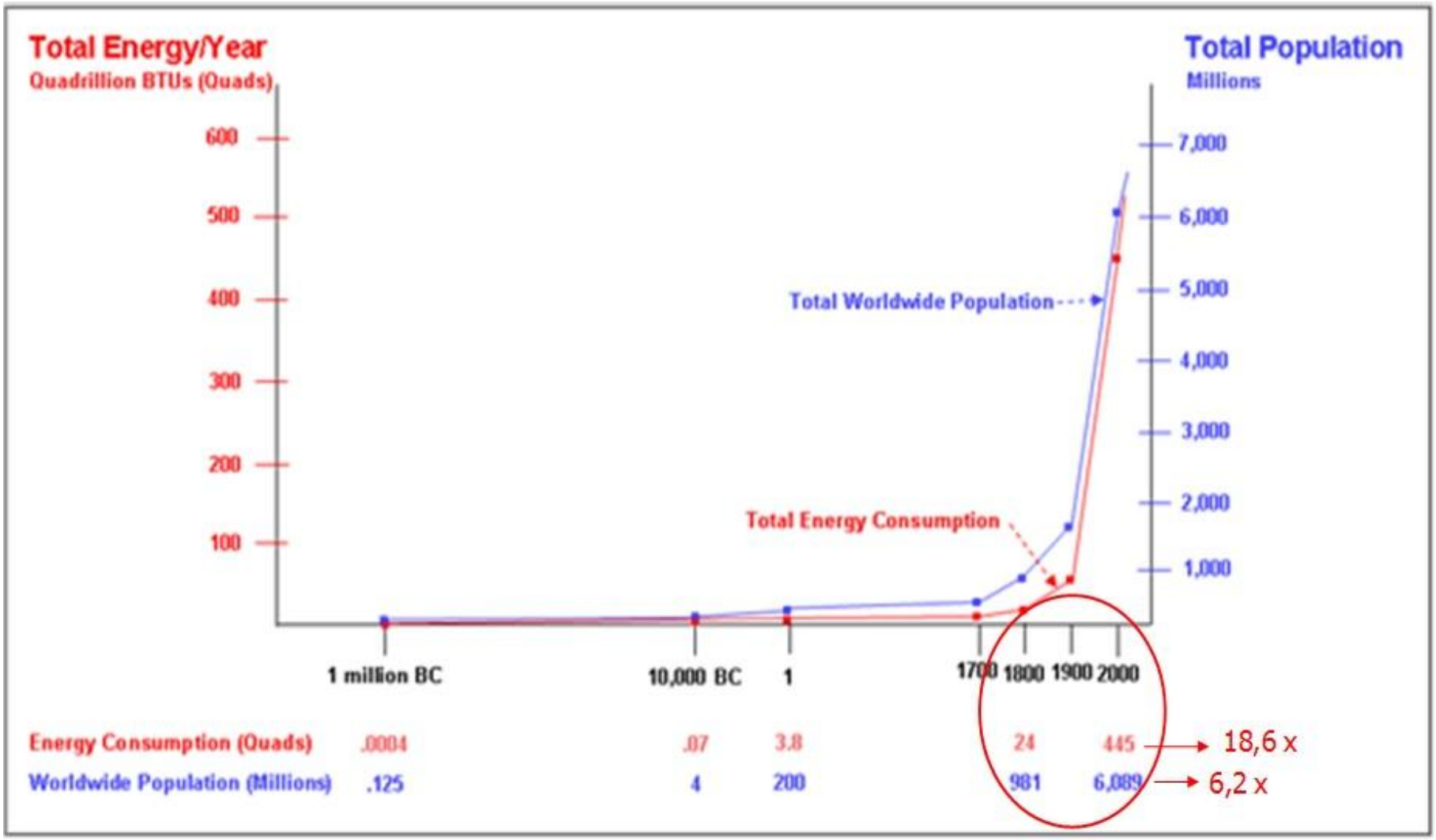


Fonte: http://www.withouthotair.com/, 2010

Energia e Desenvolvimento Social

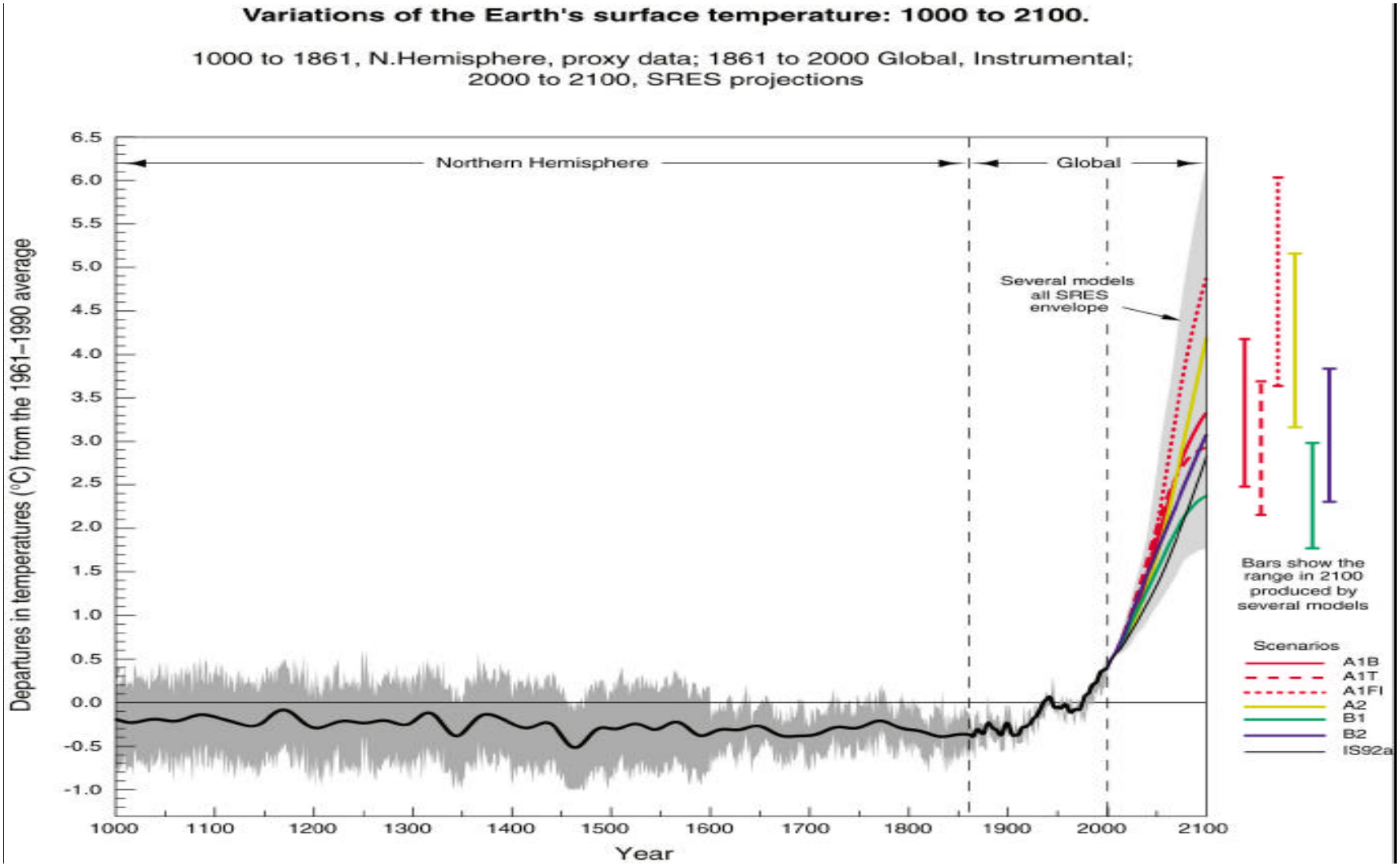


Esgotamento dos Recursos Naturais



Fonte: http://www.theoildrum.com/node/2960

Grande Problema da Sociedade Moderna:



Mudanças Climáticas:

- Controle e captura de emissões (Tecnologia)
- Reduzir a população (politica-estado)
- Mudanças no padrão de consumo (cultural)
- **Eficiência de processos**
- **Energias renováveis**

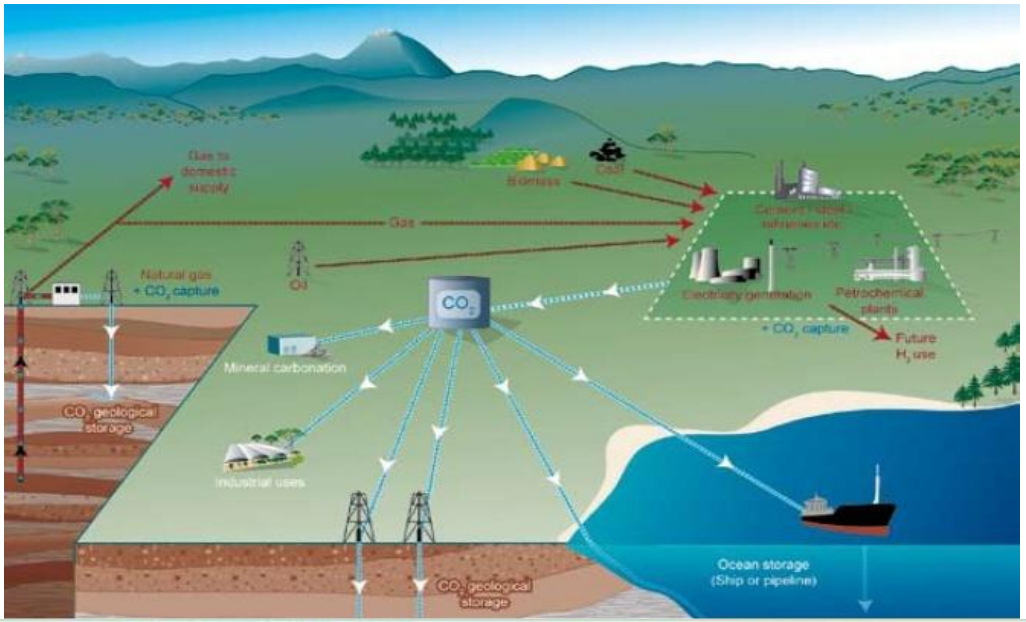
Baseado na Identidade de Kaya...

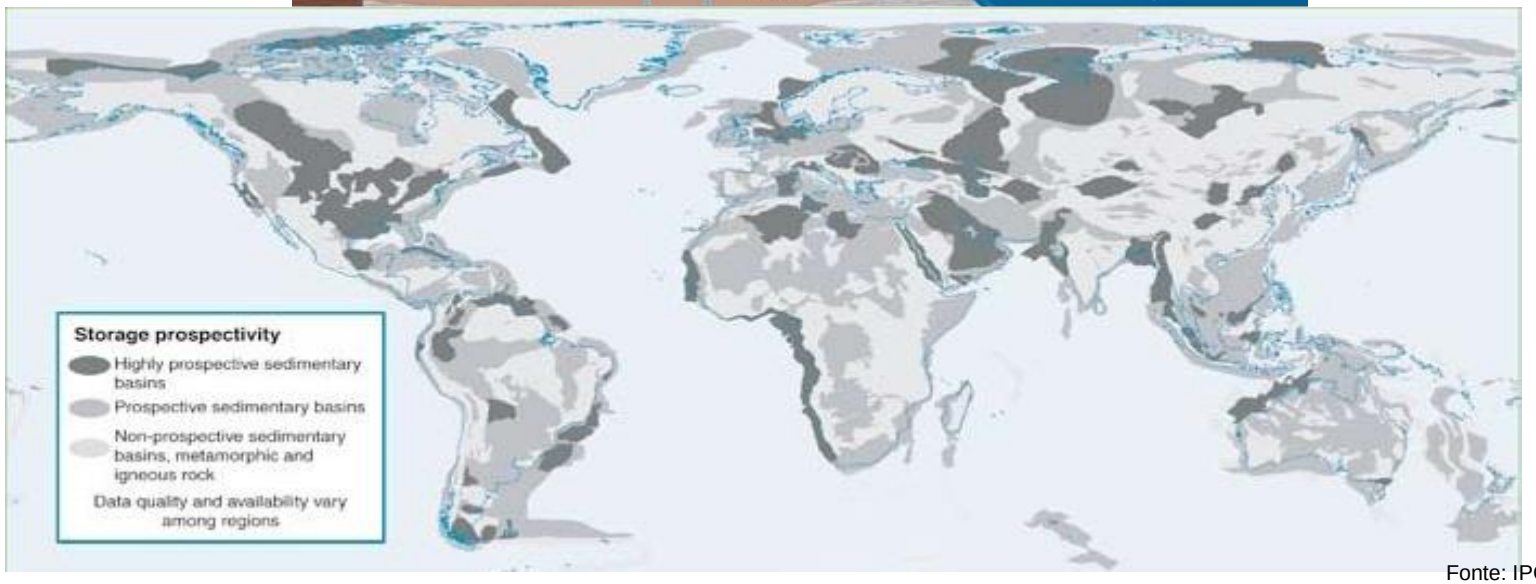
$$CO_2 = Pessoas \times \frac{Serviços}{Pessoas} x \frac{Energia}{Serviços} x \frac{CO_2}{Energia}$$

Possibilidades de atuação Local e Global...

http://www.thegatesnotes.com/Topics/Energy/Innovating-to-Zero-Emissions

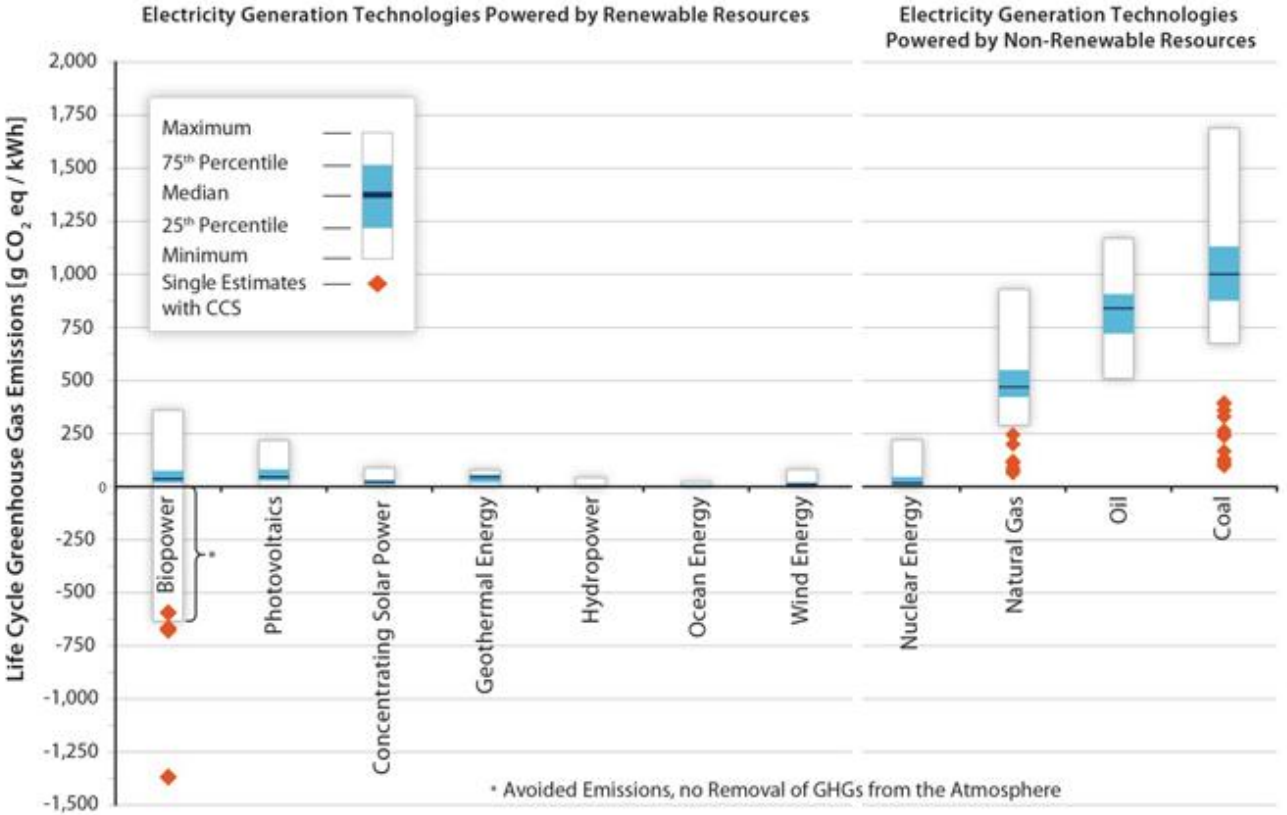
Redenção dos Combustíveis Fósseis?!...





Fonte: IPCC

Emissões de GEE e as Fontes:

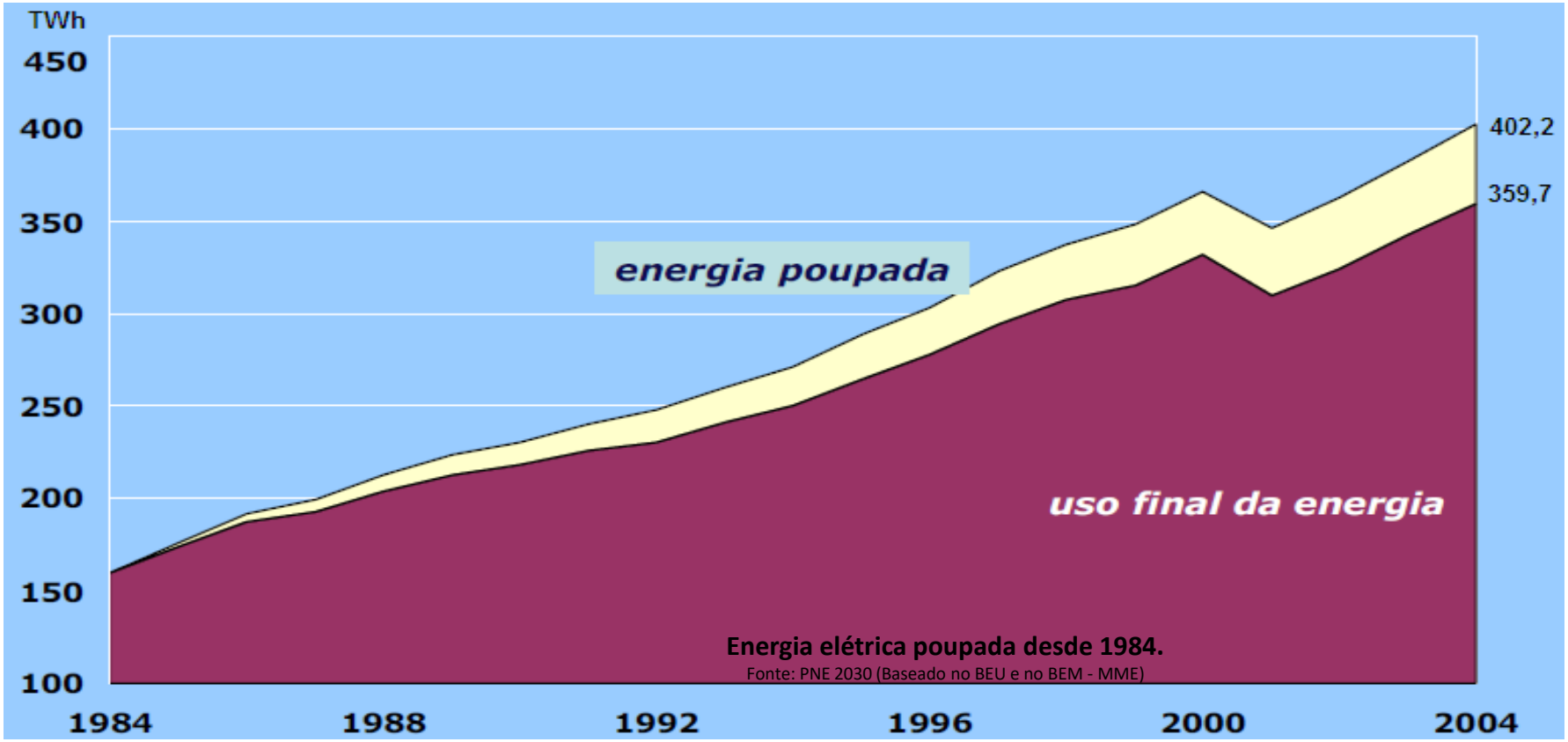


	Biopower	Photovoltaics	Concentrating Solar Power	Geothermal Energy	Hydropower	Ocean Energy	Wind Energy	Nuclear Energy	Natural Gas	Oil	Coal
Count of Estimates	222(+4)	124	36	8	28	10	126	125	83(+7)	24	169(+12)
Count of References	52(+0)	26	10	6	11	5	49	32	36(+4)	10	50(+10)

NREL NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY

ipcc INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change

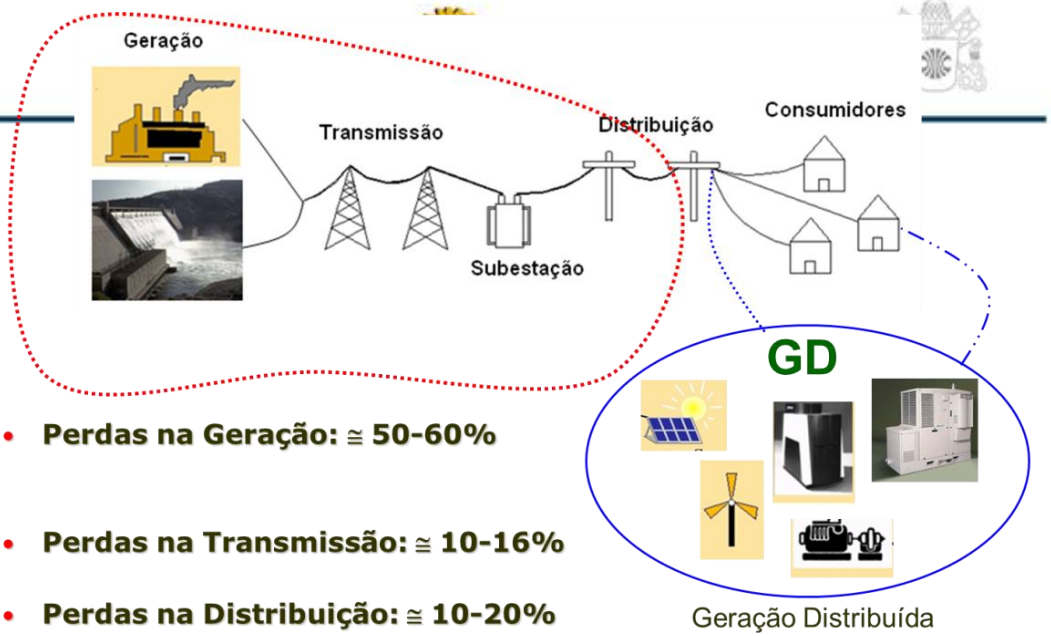
Eficiência Energética e o Aumento da Demanda



Energia elétrica poupada desde 1984.
Fonte: PNE 2030 (Baseado no BEU e no BEM - MME)

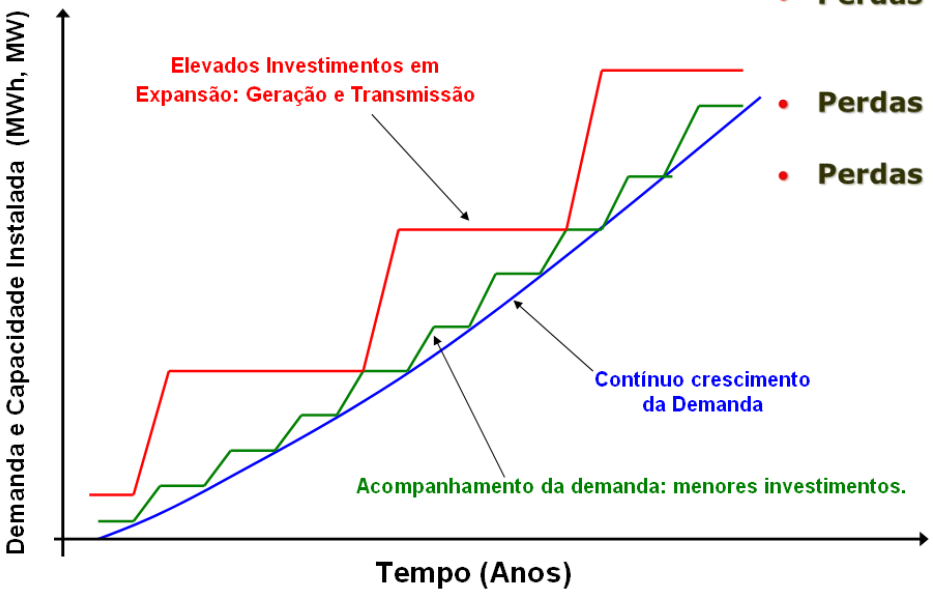
Segundo o PDE2024 → 5% do crescimento, sem muito esforço.

Geração Distribuída:



- **Perdas na Geração: ≅ 50-60%**
- **Perdas na Transmissão: ≅ 10-16%**
- **Perdas na Distribuição: ≅ 10-20%**

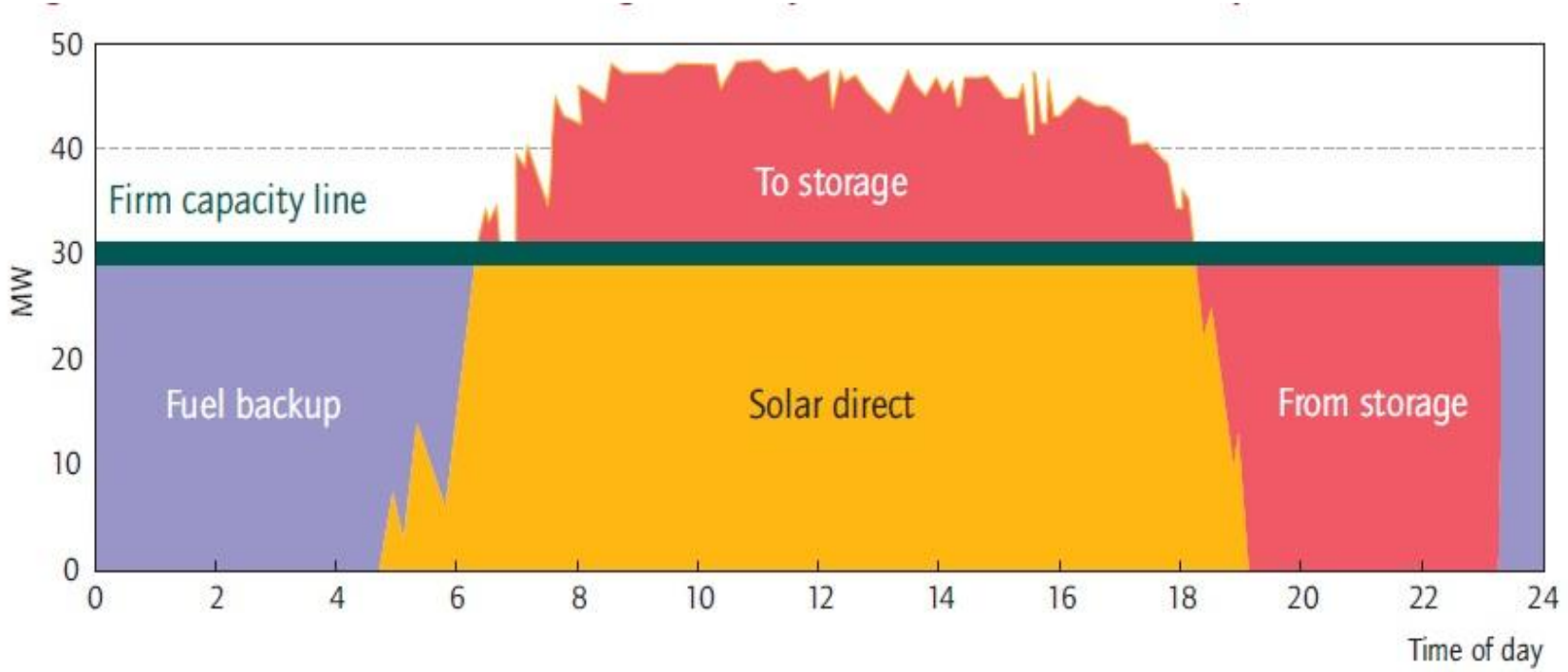
Fontes: EPE/MME, ELETROBRAS



Fonte: Furtado, J. G. M. – 6º Seminário PaCOS (2009)

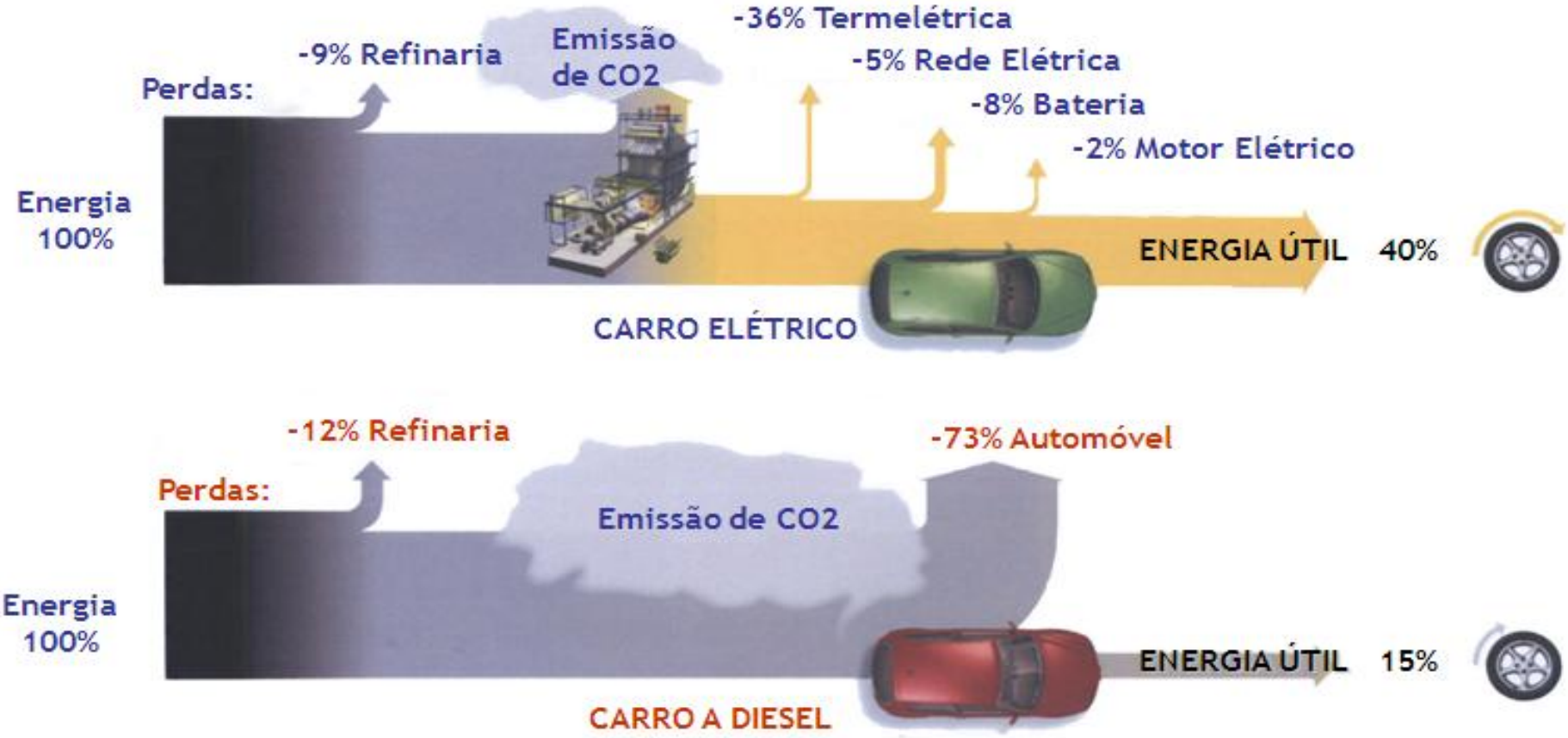
- Microturbinas
- Painéis fotovoltaicos
- Turbinas eólicas
- Grupos Geradores Diesel
- Pequenas e Micro Centrais Hidrelétricas
- Células a Combustível
  - SOFC (PaCOS)
  - MCFC
  - PEMFC
  - PAFC
  - AFC
  - e outros tipos...

Energia Solar: fonte intermitente



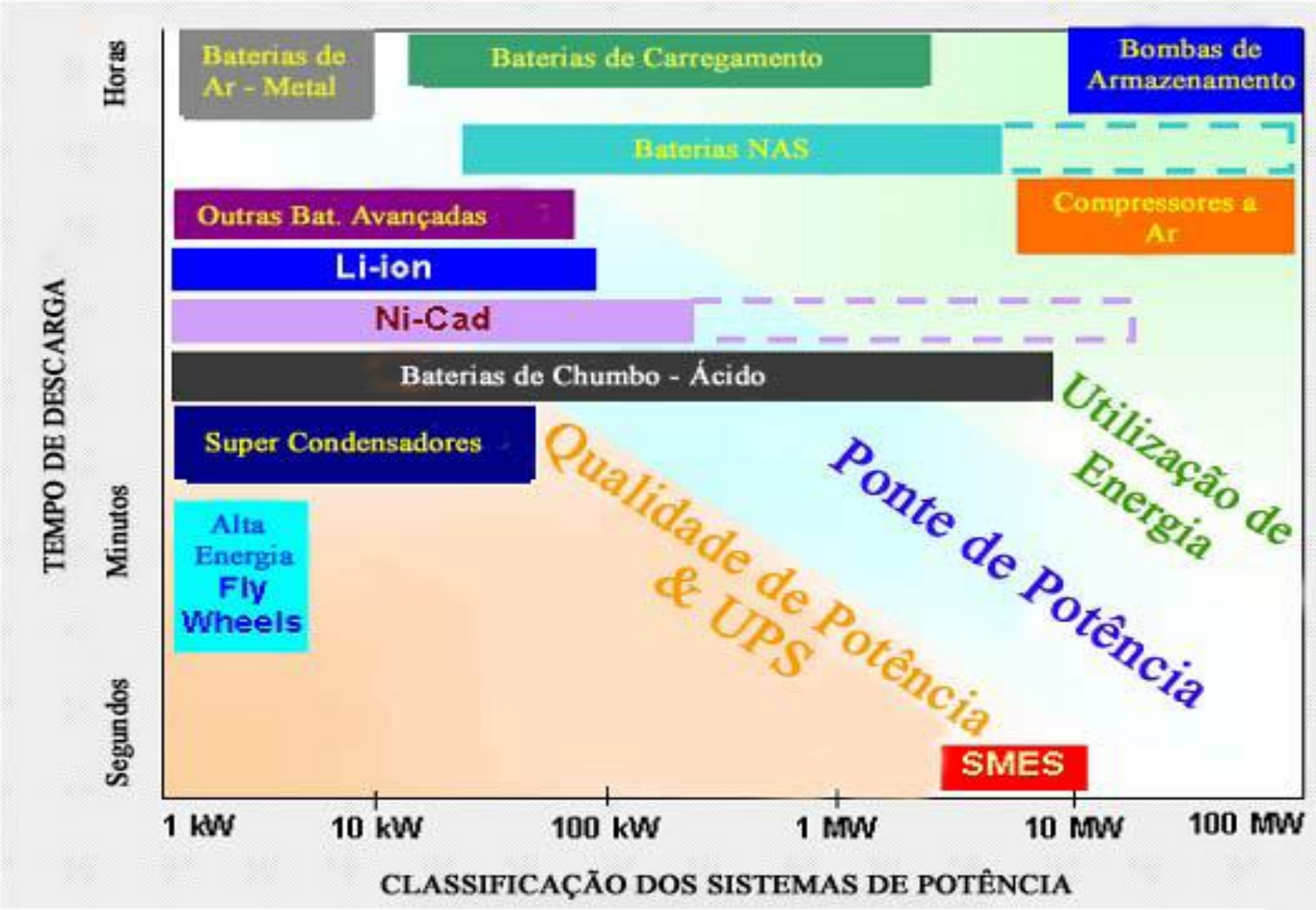
Fonte: Technology Roadmap: concentrating solar power.

O carro do Futuro será Elétrico...



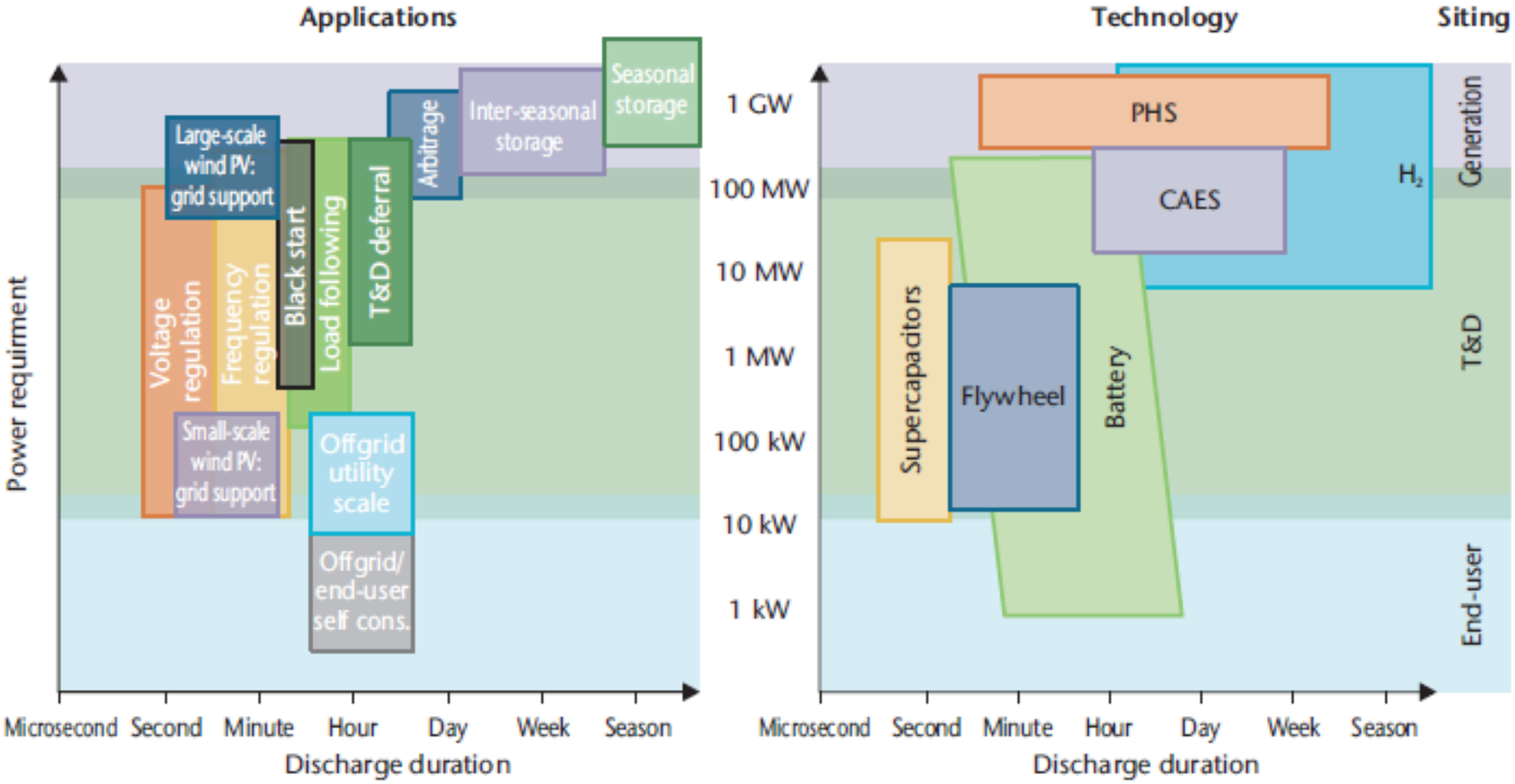
Eficiência Energética do carro elétrico e de um carro a Diesel.
Fonte: Projeto VE - Itaipu Binacional

Sistemas de armazenamento



Fonte: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Figure 5: Electricity storage applications and technologies



Note: CAES = compressed air energy storage; PHS = pumped hydro energy storage.

KEY POINT: Hydrogen-based electricity storage covers large-scale and long-term storage applications.

Sistemas De Armazenamento Como parte da Solução Energética

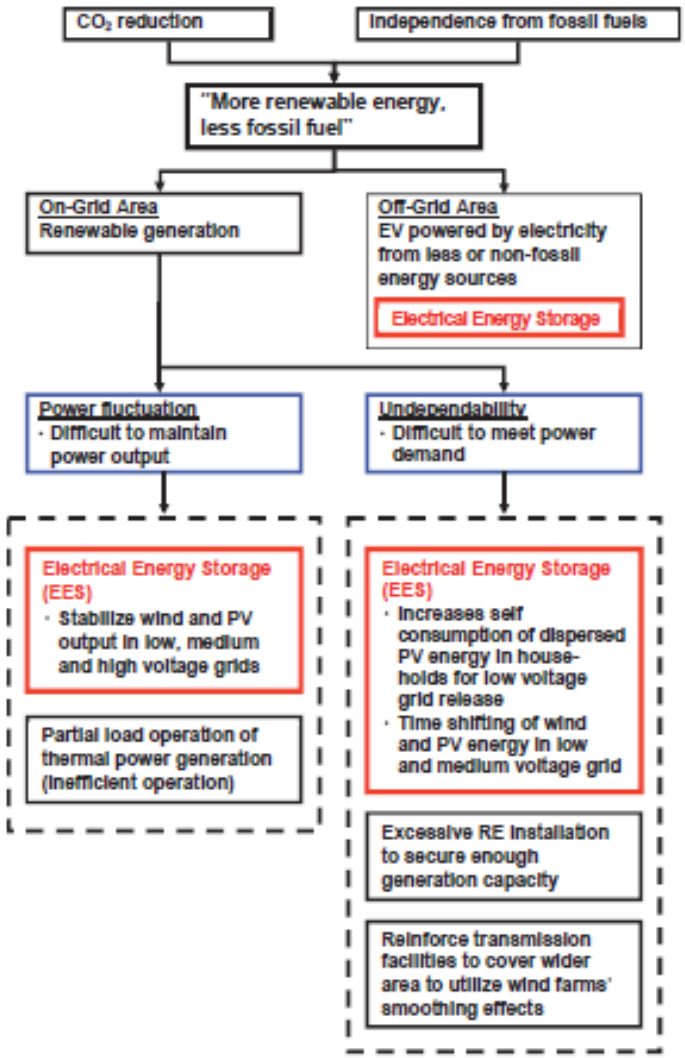
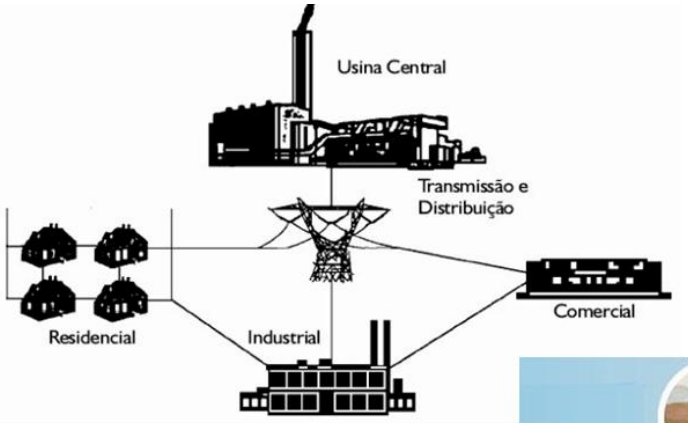
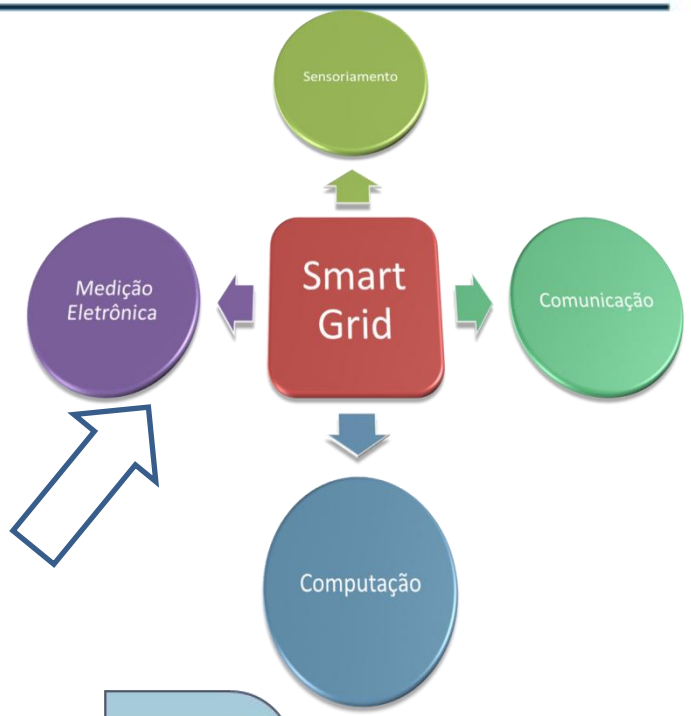


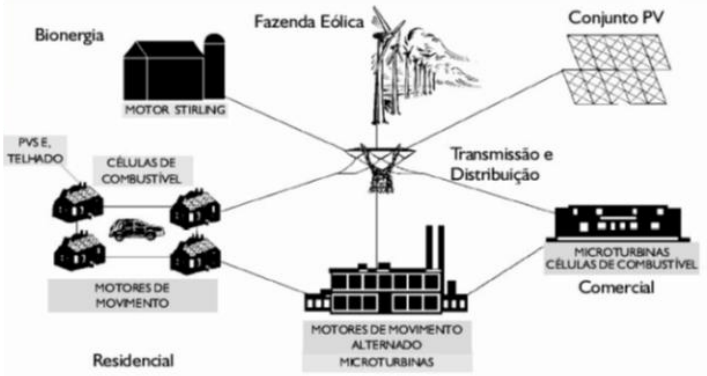
Figure 1-2 | Problems in renewable energy installation and possible solutions *(TEPCO)*

IEC, 2011

Smart Grid







Fonte: http://www.pathwaytechnologies.net/SmartGrid.shtml

Smart Grid para uma Smart City...

Smart Cities

Smart community

Machine to Machine (M2M)

Internet of Things

Smart Energy

Smart Grid

Geração Distribuída

Medição inteligente

Multiutilities

Considerações- Tópico 1

2. Hidrogênio

Two hundred years of the development of hydrogen energy economy

- Water splitting by Nicholson in 1800
- H energy Prophesised by Jules Verne in 1874
- Fuel cell development from Grove to Bacon in a hundred years from 1840
- "Hydrogen Economy" Coined 1970
- H_2 a focus of IEA for decades
- International Partnership for the Hydrogen Economy founded in Washington 2003

Siigffusson, 2006

Ficção Científica?

Júlio Verne no romance (1874) *A Ilha Misteriosa:*

1801
Humphry Davy demonstrates the principle of what became fuel cells.

1839
William Grove invents the 'gas battery', the first fuel cell.

1889
Charles Langer and Ludwig Mond develop Grove's invention and name the fuel cell.

1950s
General Electric invents the proton exchange membrane fuel cell.

1959
Francis Bacon demonstrates a 5 kW alkaline fuel cell.

1960s
NASA first uses fuel cells in space missions.

1970s
The oil crisis prompts the development of alternative energy technologies including PAFC.

1980s
US Navy uses fuel cells in submarines.

1990s
Large stationary fuel cells are developed for commercial and industrial locations.

2007
Fuel cells begin to be sold commercially as APU and for stationary backup power.

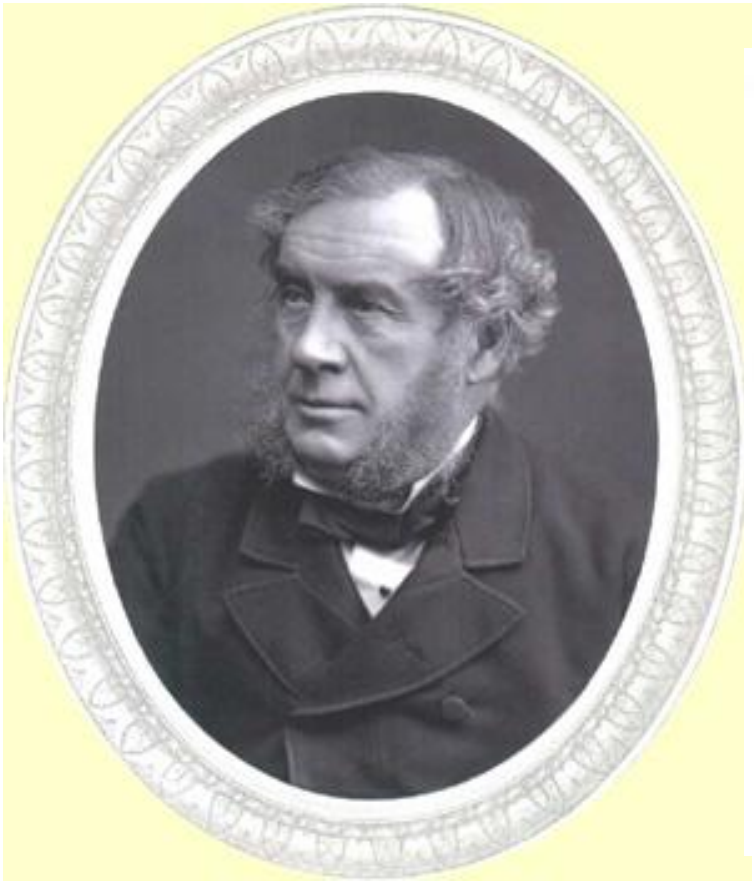
2008
Honda begins leasing the FCX Clarity fuel cell electric vehicle.

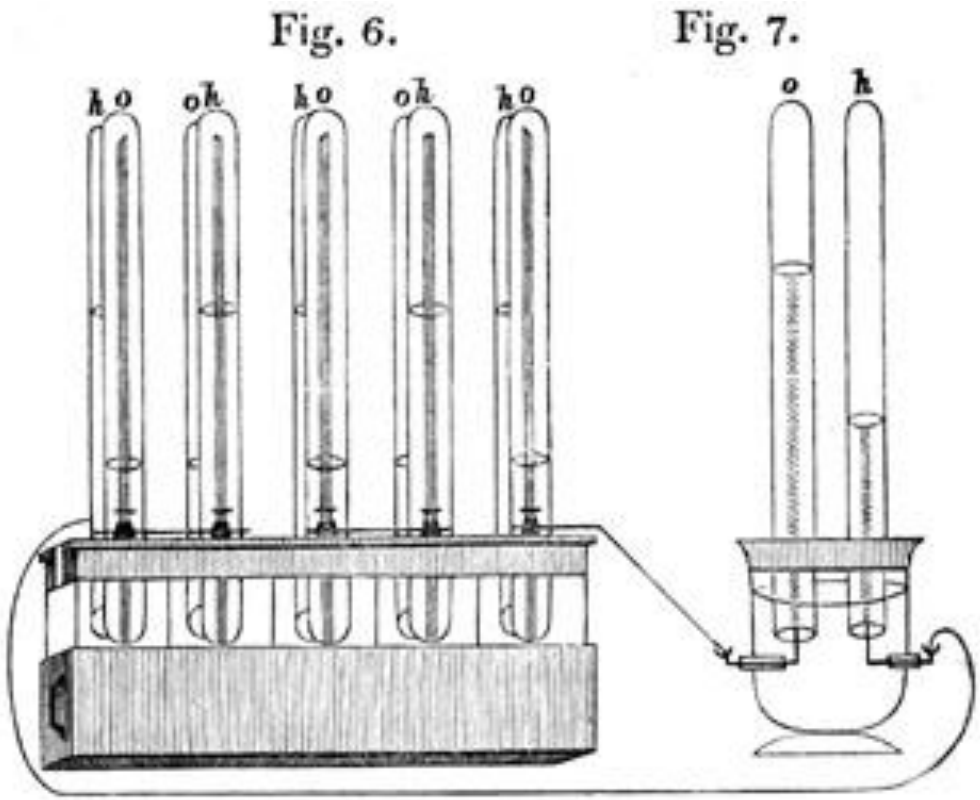
2009
Residential fuel cell micro-CHP units become commercially available in Japan. Also thousands of portable fuel cell battery chargers are sold.

Fuel Cell Today

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

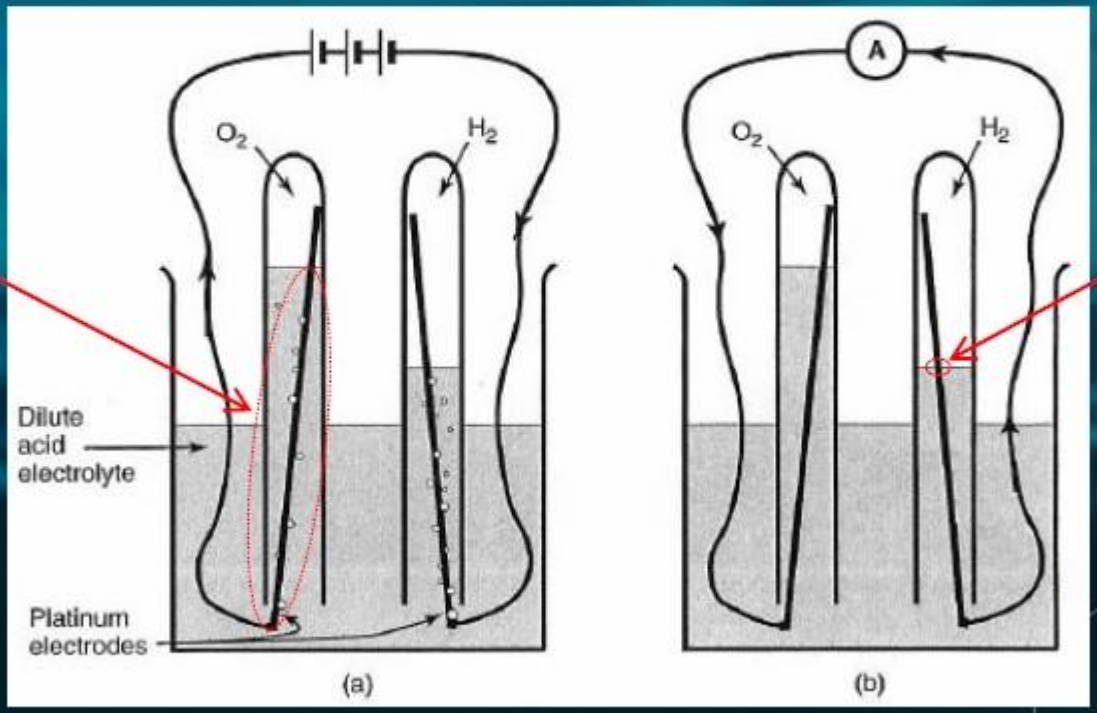
William Robert Grove (1811 -1896), used a platinum electrode immersed in nitric acid and a zinc electrode in zinc sulfate to generate about 12 amps of current at about 1.8 volts.



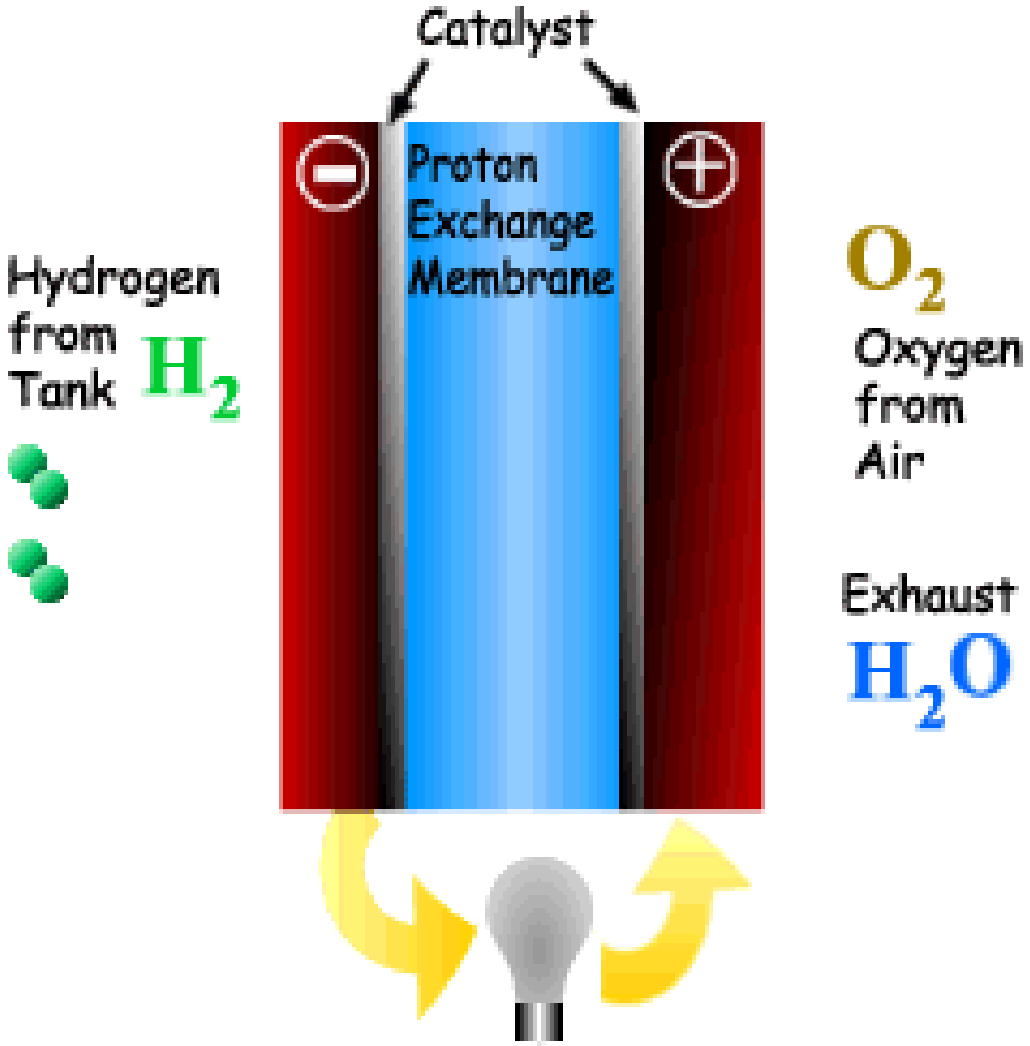


Reação oposta da eletrólise (Grove, 1839)

Área de reação



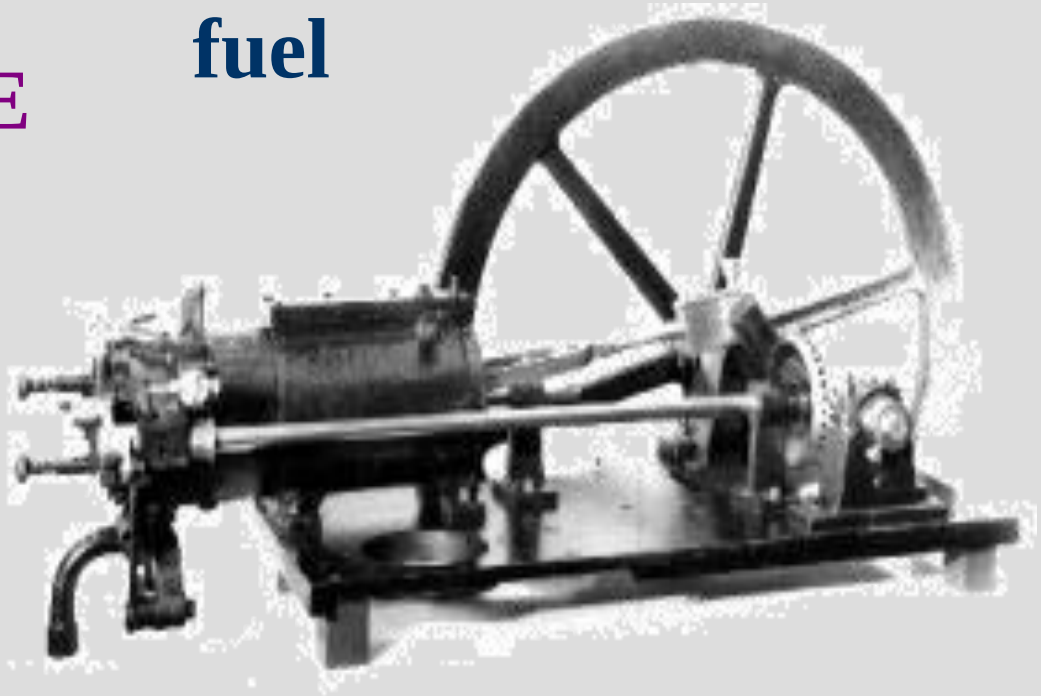
Área de reação


Catalyst
Proton Exchange Membrane
Hydrogen from Tank H_2
O_2
Oxygen from Air
Exhaust
H_2O

EARLY HISTORY OF H2

- 1800: Electrolysis
- 1820: Reverend W. Cecil proposes HICE
- 1874: Jules Verne

- 1860-70's: N.A. Otto uses ICEs and mixed H fuel



- 1930-40's: Rudolf Erren develops HICEs
- 1950: Francis T. Bacon

Década de 1950...

Gomes, 2010

Military Research into H Vehicles

- **1943: Air Force investigates LH2 fuel**
- **1956: Lockheed**
- **1960's: 'Nuclear Powered Energy Depot'**

A B-57B airplane that flew with one engine fueled by liquid hydrogen

Década de 1960...

Gomes, 2010

The Modern Era of HICEs

- ***1972*: Urban Vehicle Design Competition – UCLA Gremlin wins**
- ***1972-3*: International H2indenburg society**
- ***1980's*: H-fueled airplanes (NASA continues to study FC airplanes)**

MODERN H2 VEHICLES

- ***1993*: Ballard FC bus developed**
- ***1995+***
  - **CTA FC buses**
  - **Royal Dutch/ Shell**
  - **FC prototype cars**
  - **BMW HICE vehicles**
  - **H refueling stations open**

Ballard phase 3 FC buses, in Vancouver and Chicago

History of GM Fuel Cell Vehicles

1966

1966, GM "Electrovan"
LH_2 and LO_2 -Fuel Cell

1997 1998 1999 2000 2001 2002

Sintra Van

GM Precept FC

Chevrolet S-10 FC

FC Wagon
"Phoenix"
GM/China

Zafira Mini-Van

Zafira HydroGen1

Zafira HydroGen3

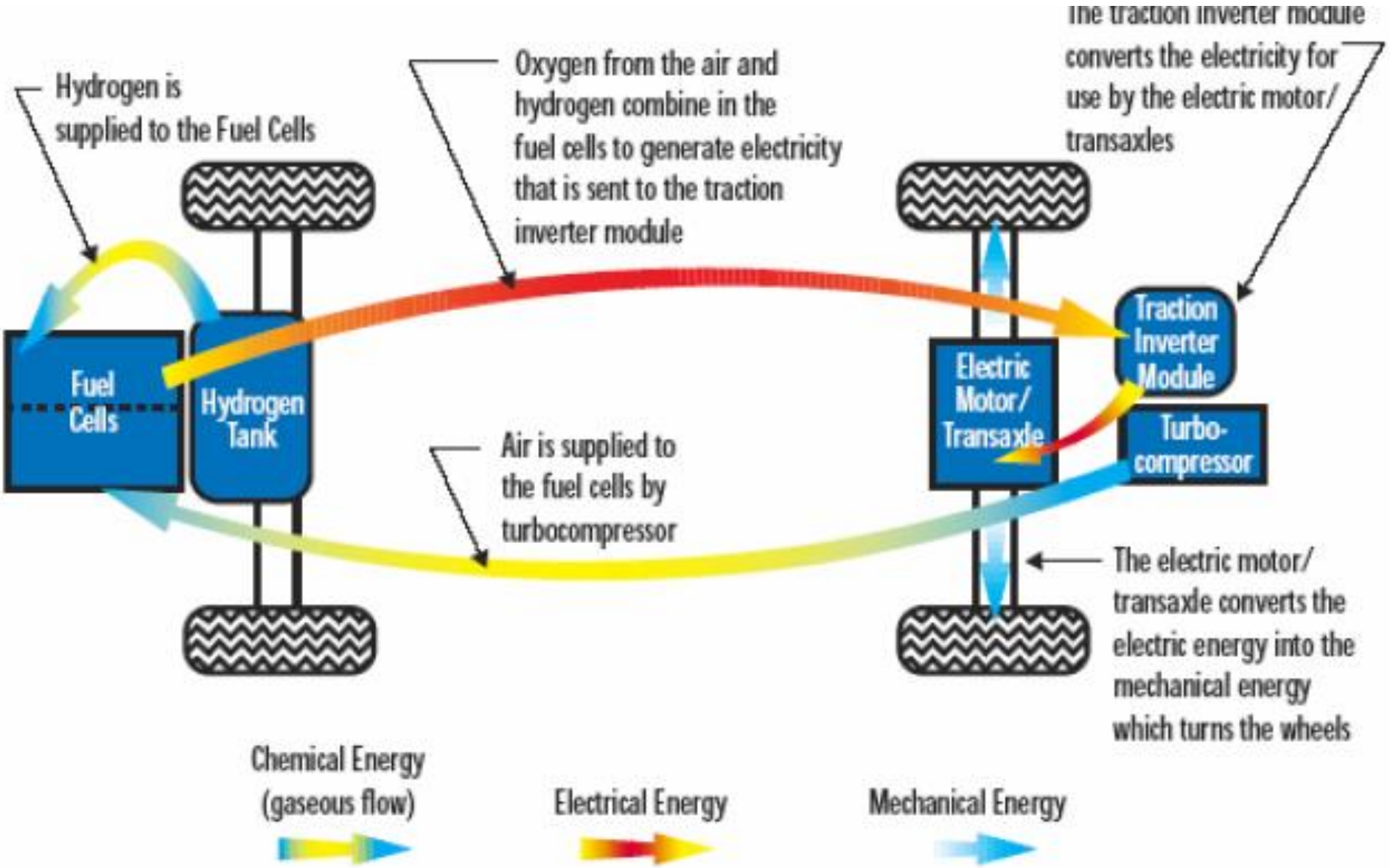
GM AUTOnomy

Hydrogen FCEV - LH2, CGH2
Hydrogen FCEV - MH

Methanol FCEV - MeOH
Gasoline FCEV - Gasoline

Hy-Wire

Almeida, 2003


Hydrogen is supplied to the Fuel Cells
Oxygen from the air and hydrogen combine in the fuel cells to generate electricity that is sent to the traction inverter module
The traction inverter module converts the electricity for use by the electric motor/ transaxles
Fuel Cells
Hydrogen Tank
Electric Motor/ Transaxle
Traction Inverter Module
Turbo-compressor
Air is supplied to the fuel cells by turbocompressor
The electric motor/ transaxle converts the electric energy into the mechanical energy which turns the wheels
Chemical Energy (gaseous flow)
Electrical Energy
Mechanical Energy

Sobre o Hidrogênio

Conhecendo o Hidrogênio

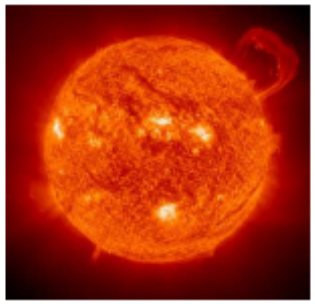
- Elemento mais abundante do universo (95% em número de átomos e 75% em massa);

- 99% da energia do universo é proveniente do hidrogênio;

- fusão nuclear (consumo de 4 milhões de ton de hidrogênio/s) / núcleo do Sol (10 milhões de °C) / pressão 10.000 vezes maior do que no centro da terra / 0,7% mais pesado que o He / sobra de matéria se transforma em luz e calor;

- ocorrência x disponibilidade.

(o ar possui 0,000055% de hidrogênio)



Alves, 2014

Algumas aplicações iniciais...

- O gás hidrogênio H_2 foi produzido pela reação química entre metais e ácidos fortes (Paracelso 1493-1541);

- Primeiro dirigível decolado com hidrogênio em 1852 (Henri Giffard);

Zeppelins: voos programados (1900) / plataformas de observação e bombardeadores durante a 1 a Guerra Mundial (1914);

1937 – primeiro acidente
(New Jersey)

O que é hidrogênio?

- É um gás, constituído de dois átomos do elemento químico hidrogênio.
- O hidrogênio é insípido, inodoro, incolor e inflamável. Sua fórmula química é H_2.

➢ <u>Século XVII</u>: início das pesquisas com o hidrogênio. Seu nome foi dado por Lavoisier (do grego, *hydro* = água, *génos* = gerar).

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hydrogenglow.jpg

Hidrogênio: propriedades

- Menor molécula;
- Incolor e inodoro;
- Não corrosivo e baixa toxidez;
- Altamente inflamável: 2318 K
- Baixa densidade;
- Alta densidade de energia por massa;
- Baixa densidade de energia por volume;
- Produtos de reação;
- Baixa energia de ignição;
- Alta velocidade de chama;
- Incompatibilidades: Ox, Li, Ha.

Gás Hidrogênio

Qual a primeira imagem que vem em nossa mente quando falamos de gás Hidrogênio?

Acidentes com o hidrogênio

Challenger, 28 Janeiro 1986

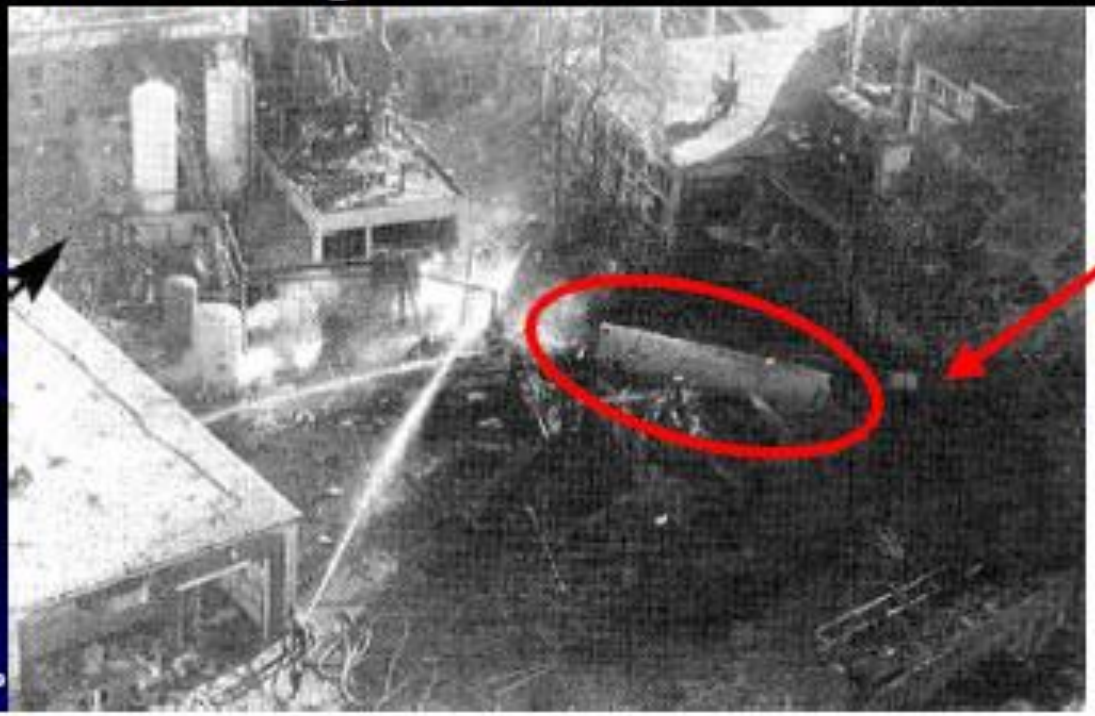
- A explosão causou a morte de sete astronautas.
- Causa: selamento defeituoso num propulsor auxiliar alimentado com combustível sólido.

Fonte: LH2 UNICAMP

Acidentes com o hidrogênio

Acidente com tanque, Hanau 1991 (1)

- Um tanque com 100 m^3 de gás com pressão máx de 45 bar estava situado num pátio industrial em Hanau (área de Frankfurt). Numa manhã ele explodiu sem razão aparente. Houve grande dano.



Fonte: LH2 UNICAMP

Acidentes com o hidrogênio

Simulação de um acidente (1)

Propano

permanece próximo ao solo

Hidrogênio

eleva-se

abastecimentos porões, trincheiras etc.

risco de ignição!

distancia-se de fontes de ignição

desaparece rapidamente

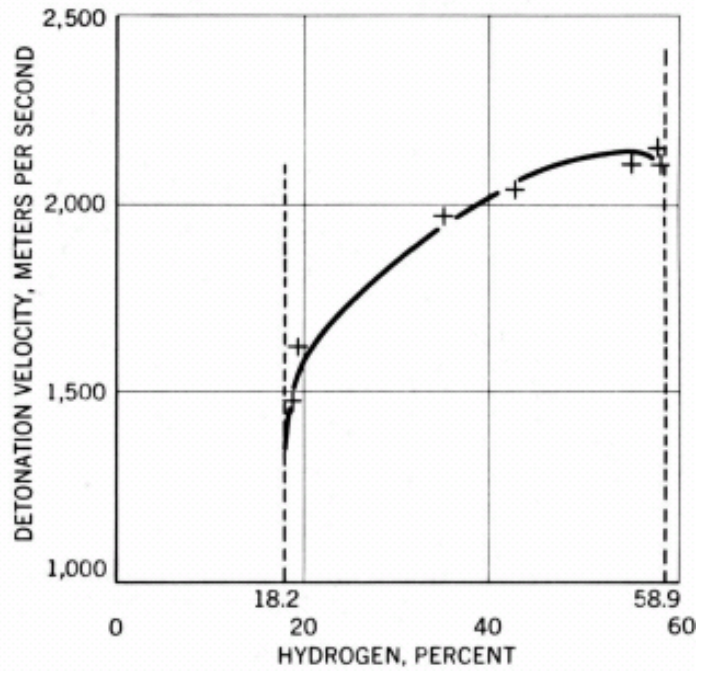
Hidrogênio: segurança

Δp (bar)	Danos
0,020	Danos ao telhado; 10% vidros quebrados
0,048	Danos menores às estruturas de casas
0,068	Demolição parcial casas (s/ cond. morar)
0,156	Limite inf. p/ danos estruturais severos
0,170	50% de destruição de estruturas de tijolos
0,34 – 0,48	Quase completa destruição de casas

Sobre-pressão (bar)	Rompimento de Tímpano
0,16	1%
0,19	10%
0,43	50%
0,84	90%

Sobre-pressão (bar)	Morte por Hemorragia Pulmonar
1,00	1%
1,20	10%
1,40	50%
1,75	90%
2,00	99%

Considerações sobre Explosão



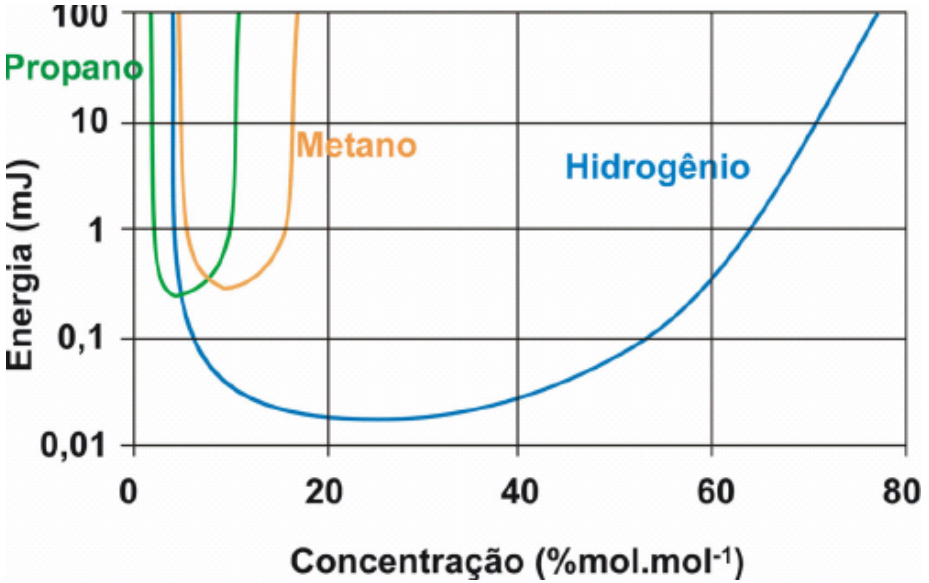
Fonte: Curso de Cromatografia de Gases Ultrapurificados – CENEH/UNICAMP, 2007

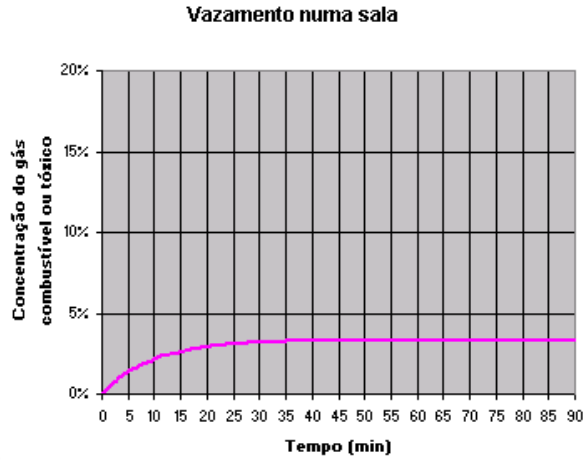
Segurança

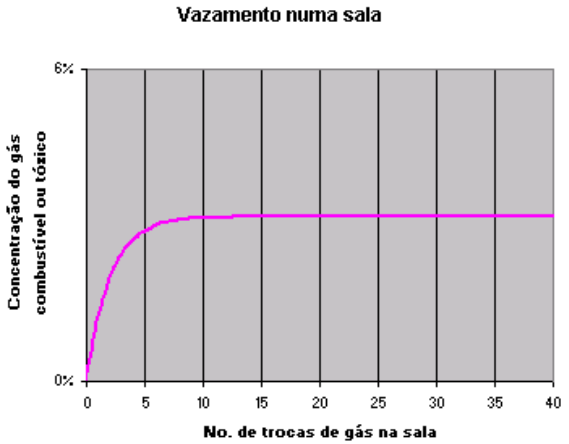
- Limites de Inflamabilidade.
- Confinamento;
- Diluição e Purgas do sistema:

$$C = C_0 \cdot \exp^{-\frac{V}{V_0}}$$

$$C_k = C_0 \left(\frac{P_i}{P_f} \right)^k$$







Fonte:TE

Fonte: 1º EBEH(2006)

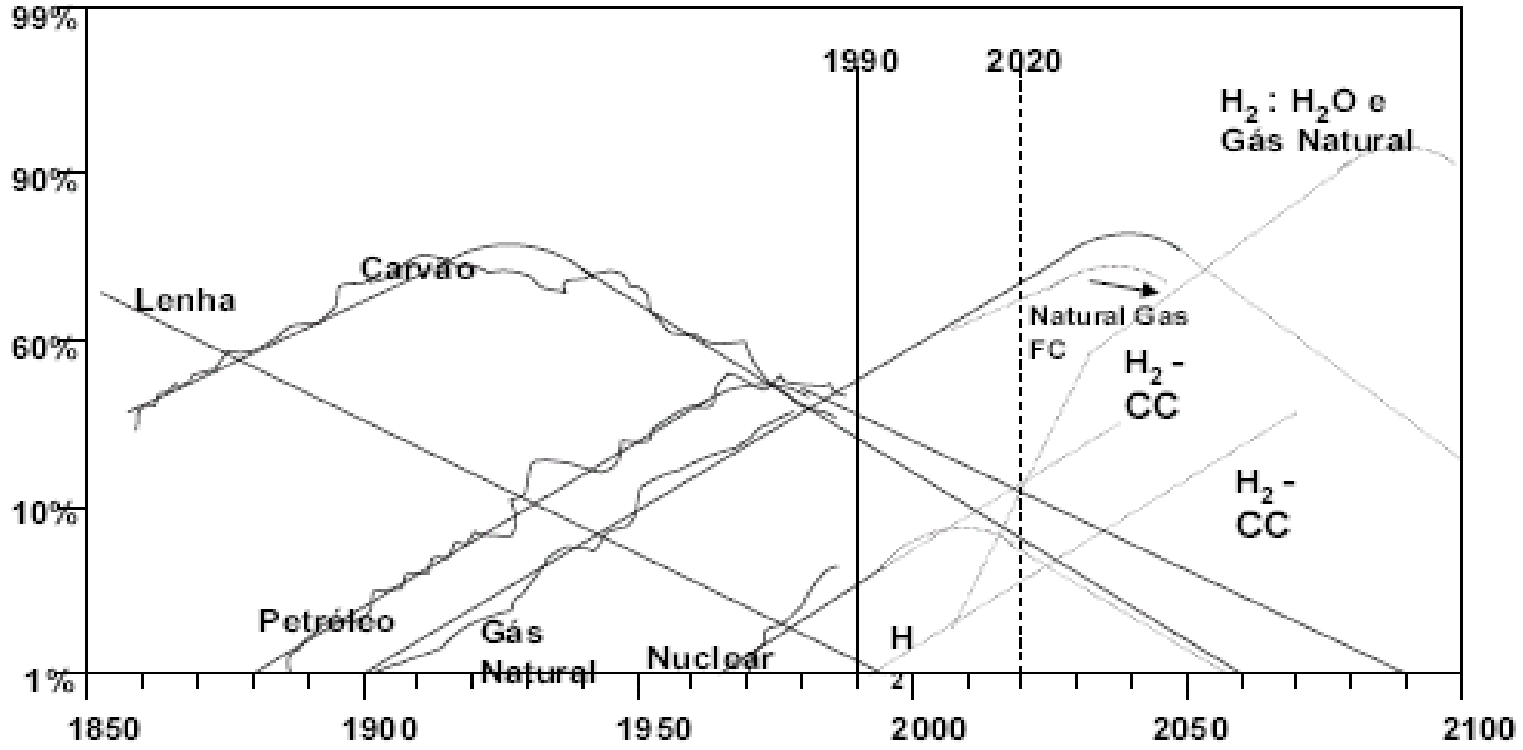
Resumo com questões de segurança

- Conhecer e respeitar o Hidrogênio;
- Gás: asfixiante – Líquido: queimaduras
- No projeto: considerar normas; na construção usar equipamentos específicos (pressão e elétrica);
- Prever sistema de detecção e de vazamento de gases;
- Sistema de ventilação;
- Eliminar fontes de ignição;
- EPI e EPC;
- Ações de planejamento;
- Armazenamento adequado de cilindros;
- Transporte em pé, usando carrinhos e com cuidado;
- Usar equipamentos apropriados e em condições de uso;
- Manual de Segurança – NASA: https://core.ac.uk/download/pdf/42772906.pdf

Por que o Hidrogênio???

- Abundante e renovável;
- Vetor Energético;
- Democratização;
- Sobrecarga nas fontes;
- Emissão;
- Modularidade;
- Eficiência;
- Silenciosos;
- **Flexibilidade...**

Descarbonização da Fonte



Fonte: C. Marchetti and N. Nakicenovic. "The dynamics of energy systems and the logistic substitution model" International Institute for Applied Systems Analysis, Austria.

Transições nos Sistemas de Energia

Hidrogênio & Emissão de CO2
Matriz Energética Brasileira
Etanol & Fontes de Hidrogênio
Células a Combustível
Considerações Finais

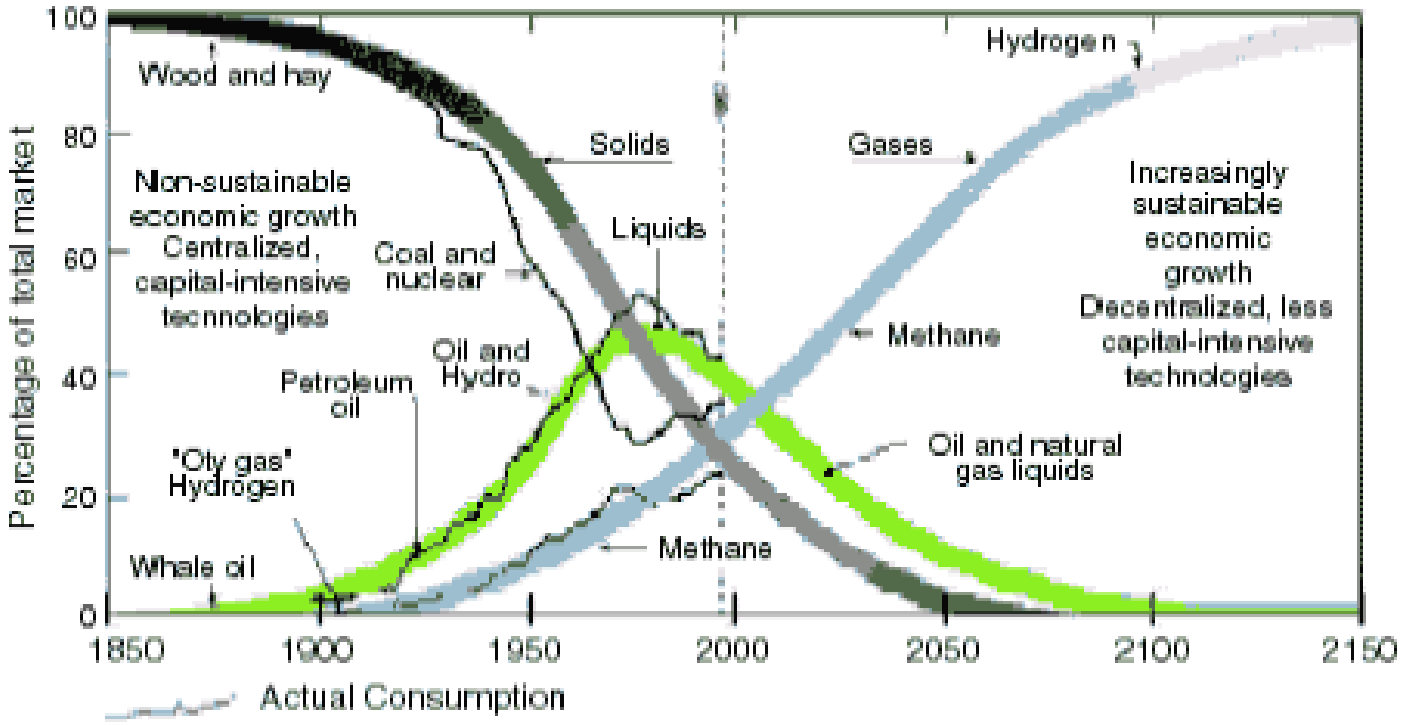


FIGURE 3. The age of energy gases – global energy systems transition

Hefner RA, GHK Company: The age of energy gases.

"Economia do Hidrogênio"

Mudança de perfil

"Construindo a Infra-estrutura"

Eletrólise da água e processos Biológicos tornar-se-ão mais importantes

"Criando o mercado"

Intensificação do uso de Biomassa e HCs mais leves

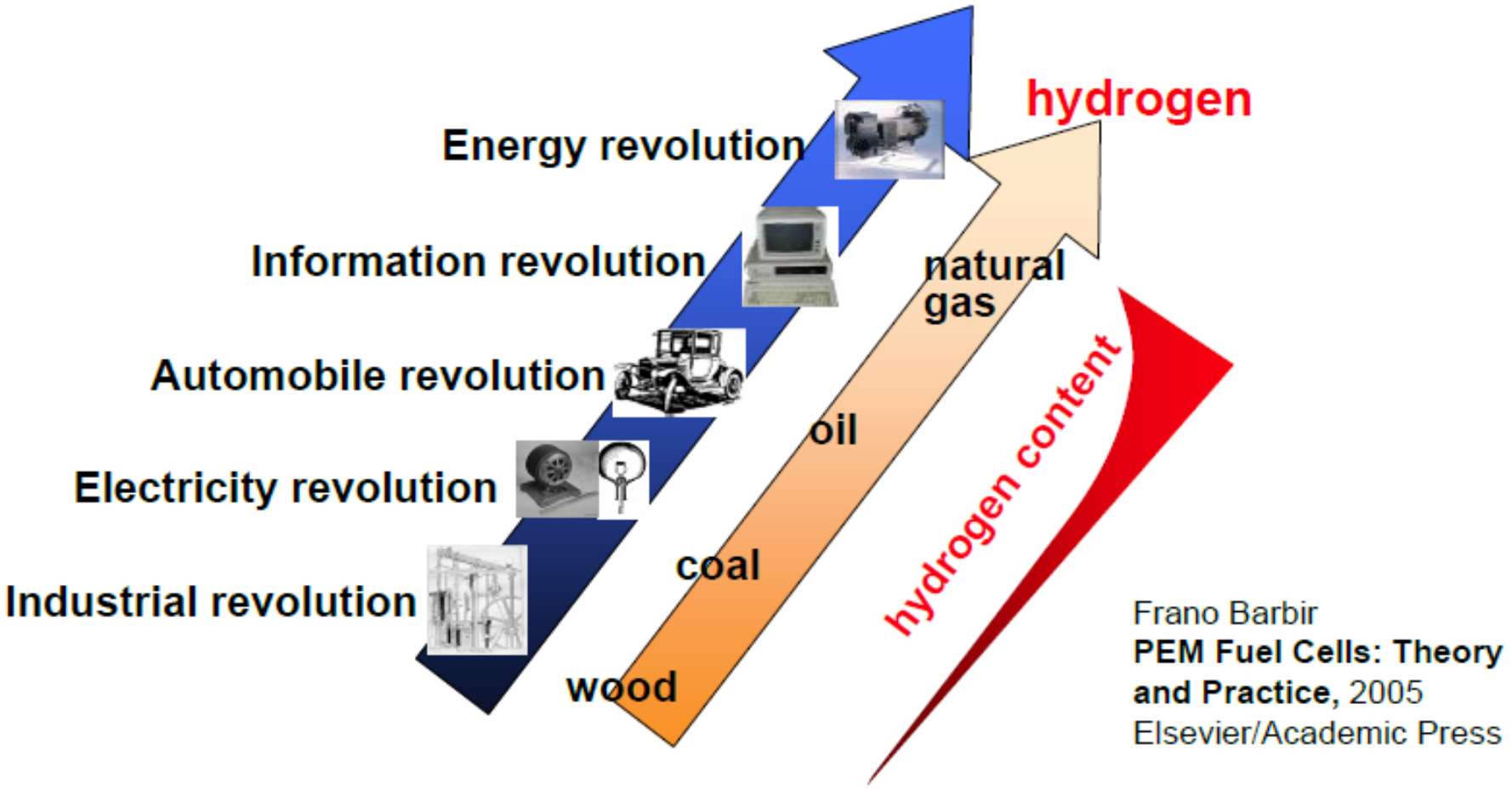
Uso crescente do GN, pequenas unidades de eletrólise. Hidrogênio pressurizado.

Tempo

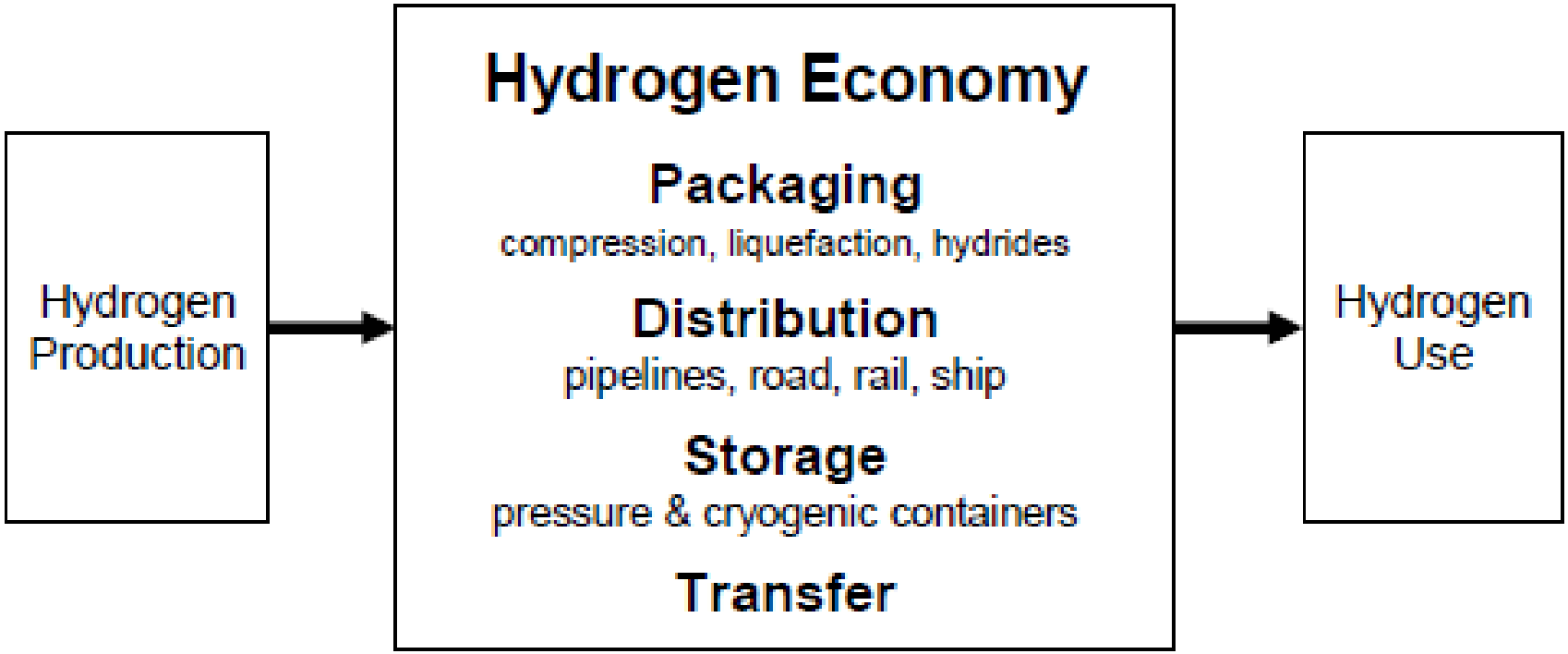
Source: Hydro.

Fontes:Adaptação com base em DoE Report (2007), IPHE (2007).

Hidrogênio como parte da Revolução Energética

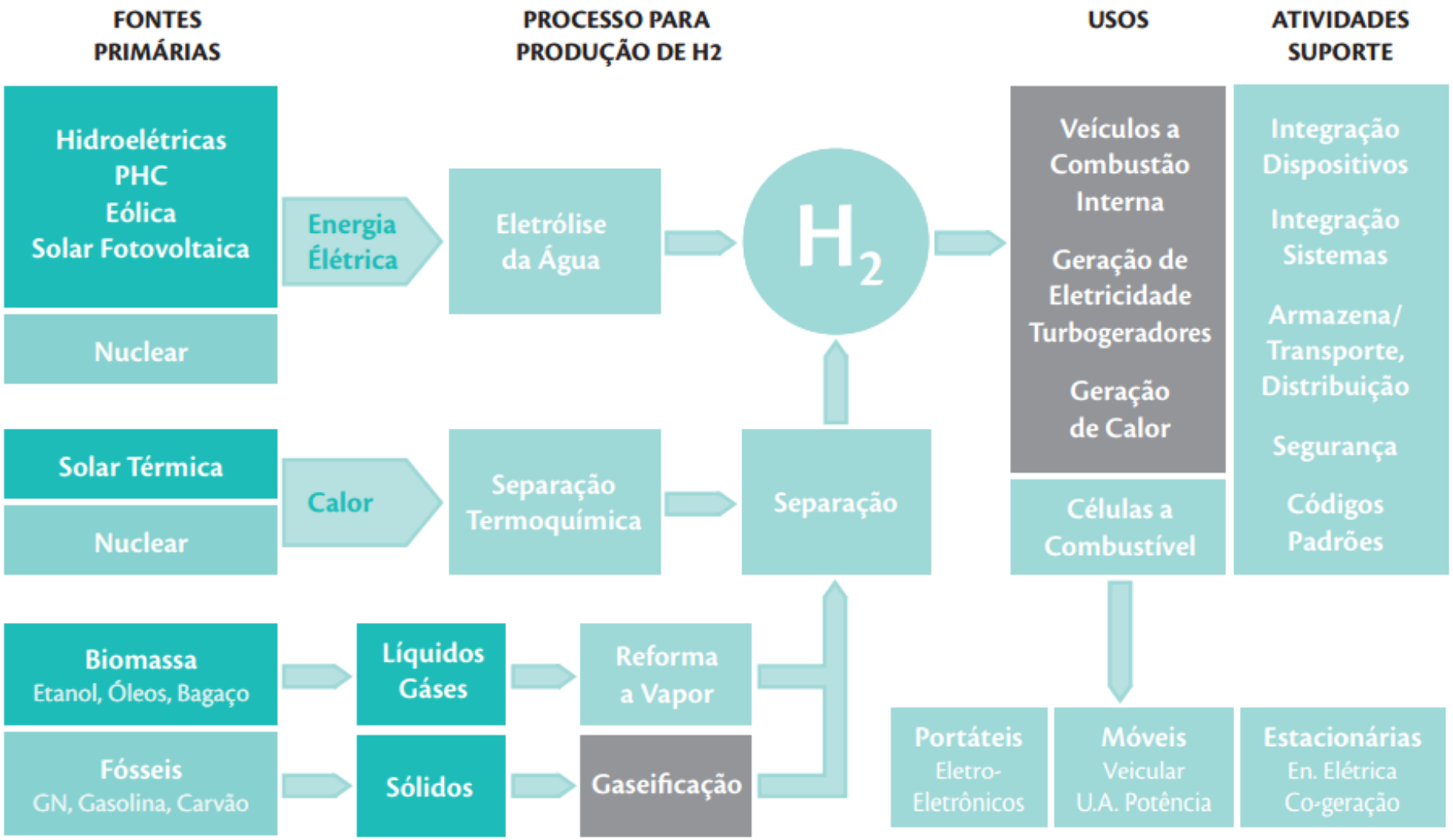


Frano Barbir
PEM Fuel Cells: Theory and Practice, 2005
Elsevier/Academic Press


Hydrogen Production
Hydrogen Economy
Packaging
compression, liquefaction, hydrides
Distribution
pipelines, road, rail, ship
Storage
pressure & cryogenic containers
Transfer
Hydrogen Use

Bossel, 2003

Hidrogênio e suas tecnologias



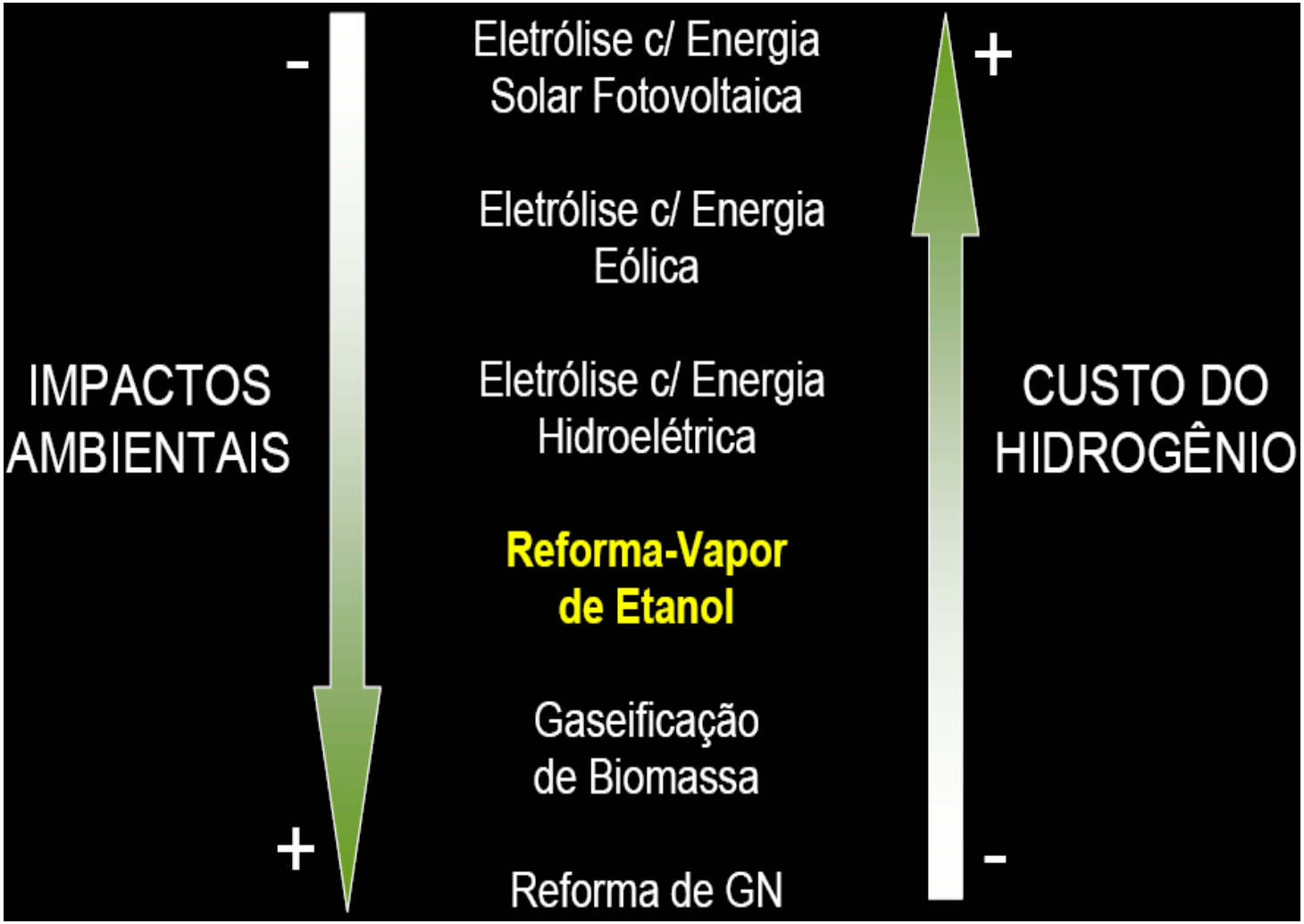
Fonte: CGEE, 2010

Vetor Energético

FONTE	ENERGIA	PROCESSO
Água	Eletricidade	Eletrólise, Fotólise, Eletrólise do Vapor, Decomposição Termoquímica ou Processo Fotoeletroquímico
Gás Natural (rico em CH4)	Gás Natural	Reforma Catalítica ou Craqueamento Térmico
Petróleo	Petróleo	Reforma ou Gaseificação de Petróleo
Carvão	Carvão	Reforma ou Gaseificação de Carvão
Etanol	Etanol	Reforma do Etanol
Metanol	Metanol	Reforma do Metanol
Biomassa	Biomassa	Gaseificação da Biomassa
Biomassa ou Lixo Urbano	Calor, eventualmente	Biológico (Biogás)
Bactérias Fermentativas	Bactérias Fermentativas	Fermentação de Compostos Orgânicos
Bactérias Fotossintetizantes	Energia Solar	Fotodecomposição de Compostos Orgânicos
Algas Verdes e Cianobactérias	Energia Solar	Biofotólise
Hidrocarbonetos Pesados	Hidrocarbonetos	Oxidação Parcial
Nuclear	Nuclear	Térmico ou Termoquímico
Solar	Solar	Termoquímico ou Fotoquímico
Água e Biomassa	Calor ou luz, eventualmente	Alternativos

Fonte: Silva, E. P. (2008)

Hidrogênio: Custos x Impactos



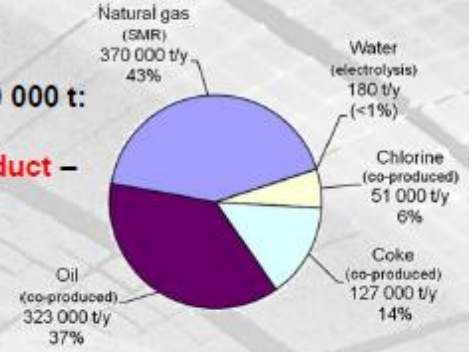
Fonte: Peres, E. – LH2 - Unicamp

Produção de Hidrogênio

Billions Nm^3/an		World		Europe (2006)	
Fossil	Natural gas	309,1	49 %	39,0	42 %
	Oil	182,9	29 %	39,0	42 %
	Coal	113,6	18 %	3,7	4 %
Electrolysis		25,2	4 %	11,1	12 %
Total		630,8	100 %	92,8	100 %

Source : ALPHEA

France (2008)
Annual production about 920 000 t:
About 40% « voluntary »,
60% « involuntary » - By-product –
but useful: mainly burn

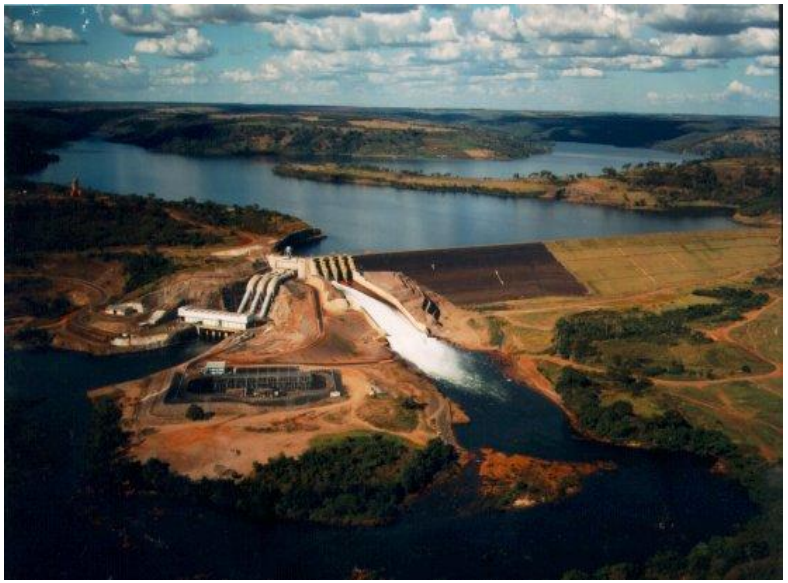


Source : CEA

Three main types of electrolysers

Technology	Working temperature	Technological maturity	Remarks
Alkaline Electrolysis	70 – 100 °C	Commercially available	Suitable for base load production
PEM Electrolysis	80 °C	Commercially available Under development	Very suitable for intermittent production (PV, Wind)
High Temperature Electrolysis (SOEC)	700 – 1000 °C	Lab scale	Needs heat source (CSP, Nuclear plant, waste management plant…)

Justificativa Original Nacional:



$$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \qquad E^0_{H_2O/O_2} = 1.23V/ENH$$

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2 \qquad E^0_{H^+/H_2} = 0.00V/ENH$$

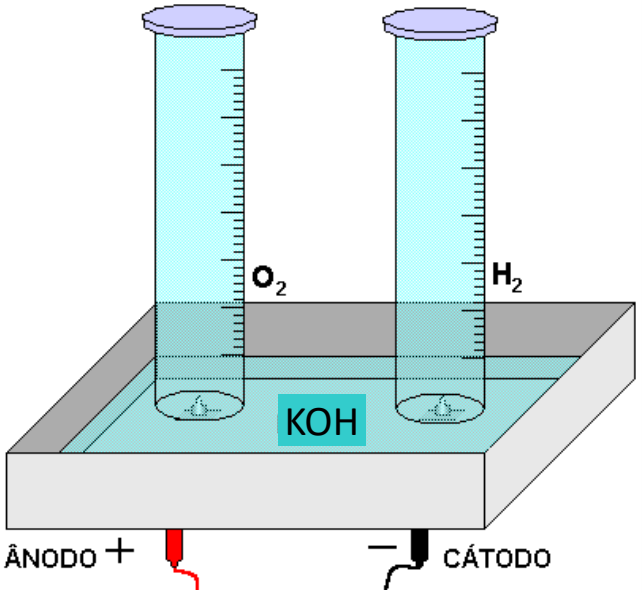
Em um sistema alcalino a reação para cada eletrodo é:

Geração de Hidrogênio no Cátodo (Alcalina)

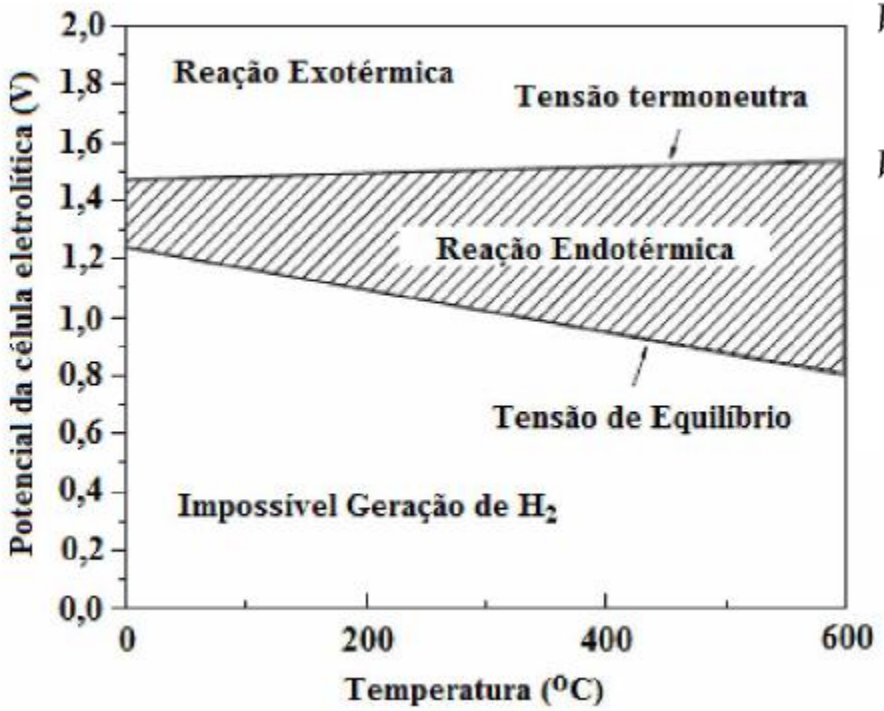
$$2\,H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^- \qquad E°_{(25°C,\,1atm)} = -0,83\ V$$

Geração de Oxigênio no Ânodo (Alcalina)

$$4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^- \qquad E°_{(25°C,\,1atm)} = -0,40\ V$$



Eletrólise: Aspectos Teóricos



$$V_{\Delta H} = V_{tn} \qquad \text{(processo ideal)}$$

$$V_{\Delta H} = \frac{\Delta H}{nF}$$

$$V_{rev} = \frac{\Delta G}{nF}$$

n=2
F=96.485,3 C/mol

Em condições padrão de temperatura e pressão (T = 298,15 K e P = 1 atm), os valores das propriedades termodinâmicas são: $\Delta G^0 = 237{,}21$ kJ/mol, $\Delta S^0 = 0{,}1631$ kJ/(mol.K), $\Delta H^0 = 285{,}84$ kJ/mol. Substituindo-se os valores de ΔG^0 e ΔH^0 nas obtêm-se os valores de

$V_{rev} = 1{,}229$ V e $V_{tn} = 1{,}481$ V, respectivamente

Palhares (2016)

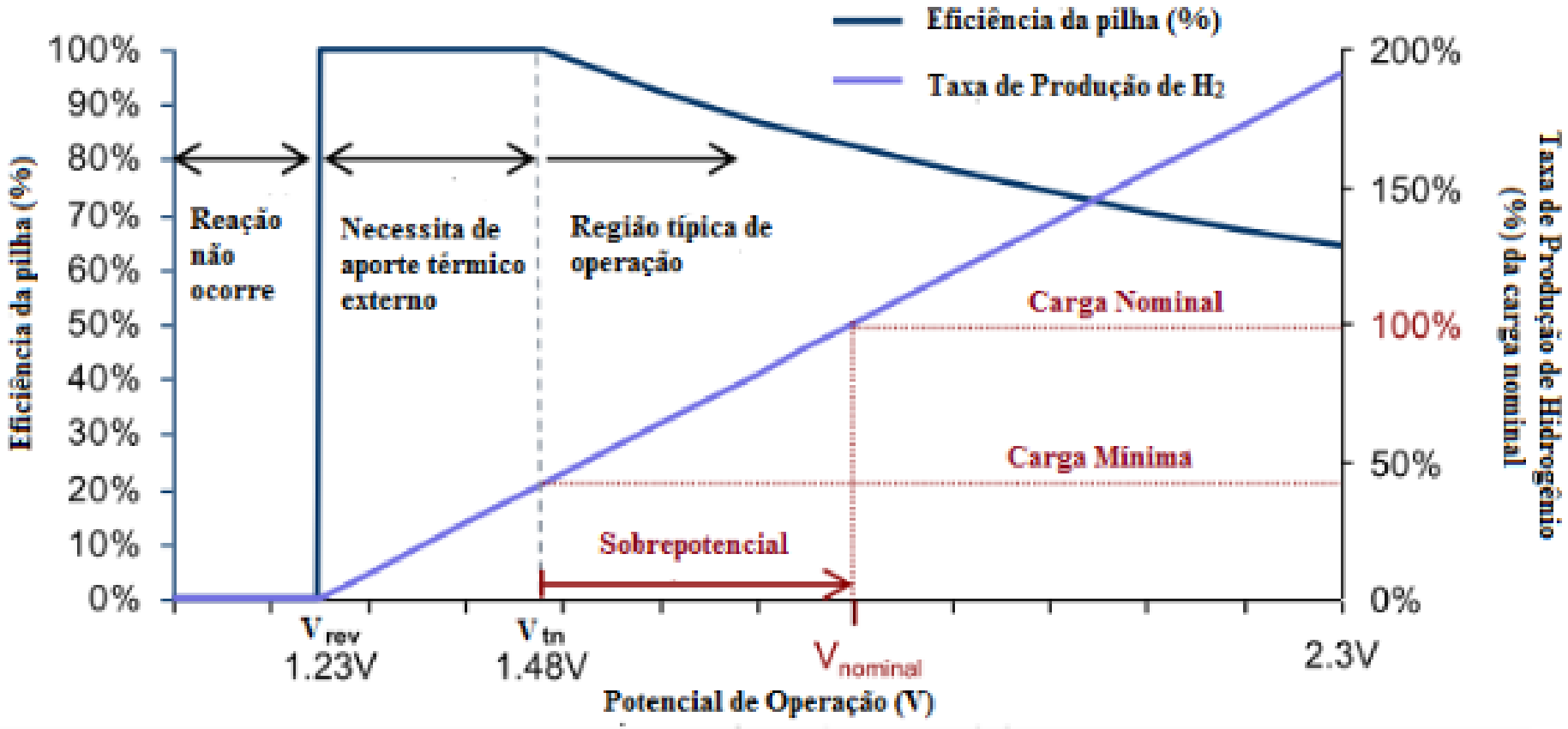
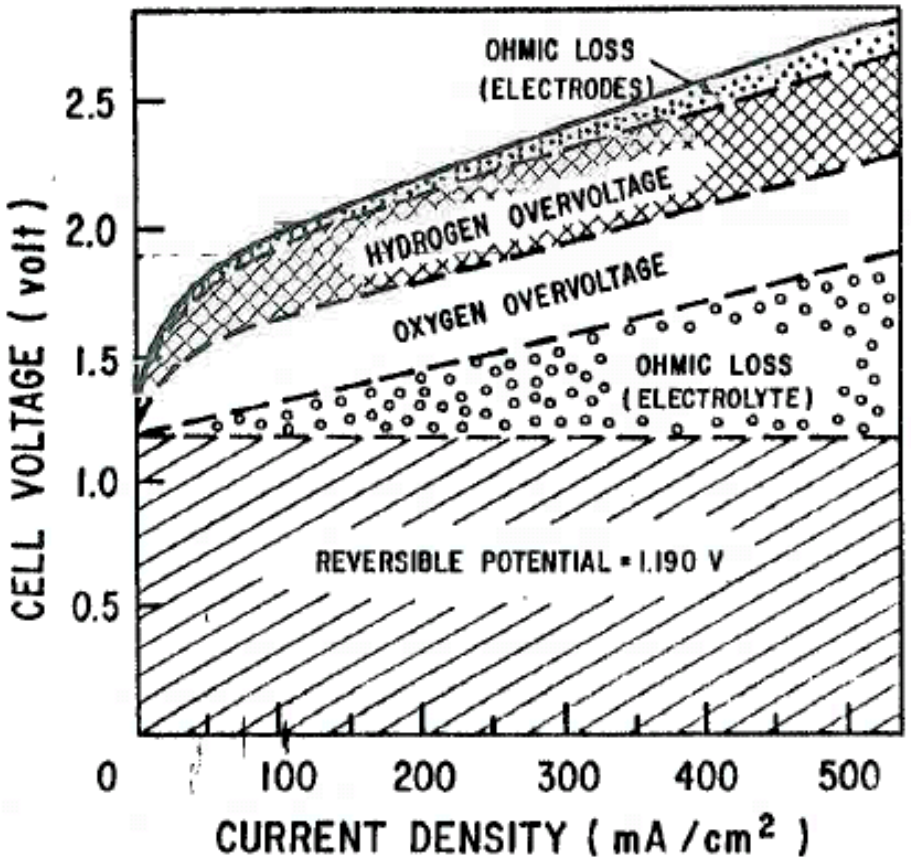


Figura 2.5 - Figura ilustrativa do intervalo de operação da eletrólise em condições ambiente

Fonte: Adaptado de DECOURT et al., 2014

Aspectos Teóricos



O dimensionamento do retificador de corrente é feito a partir da vazão de gás requerida.

1 Faraday = 96.489 Coulomb
1 g de H_2 = 0,0112 Nm^3 de H_2
1 Nm^3 de H_2 → 2.390 Ampéres
10 Nm^3 de H_2 → 23.900 Ampéres ≅ 24.000 A

Como a amperagem máxima aconselhada para uma célula é de 15.000 A, dimensionamos 2 células de 12.000 A.

Eficiência do eletrolisador em função da tensão de operação e consumo de energia.

Eficiência	Tensão de Operação	Consumo de Energia	
-	V	kWh/m³	MJ/m³
100%	1,481	3,544	12,8
96%	1,543	3,692	13,3
92%	1,610	3,852	13,9
88%	1,683	4,027	14,5
84%	1,763	4,219	15,2
80%	1,839	4,400	15,8
78%	1,899	4,544	16,4
76%	1,949	4,663	16,8
74%	2,001	4,789	17,2
72%	2,057	4,922	17,7
70%	2,116	5,063	18,2

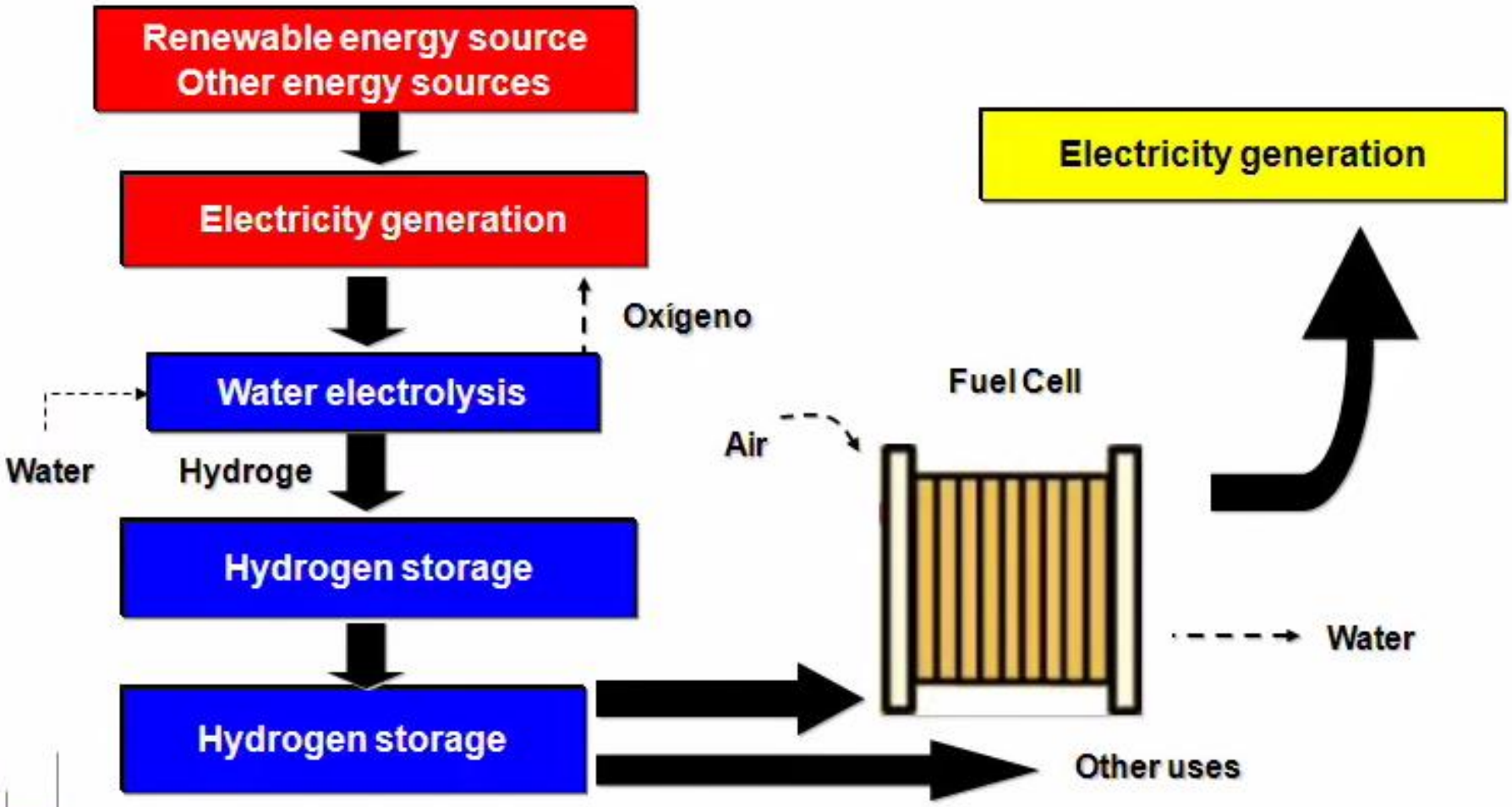
Fonte: Adaptado de SOUZA (1998)

1 mA/cm2 = 10 A/m2
V = 1,8 Vcc → normal

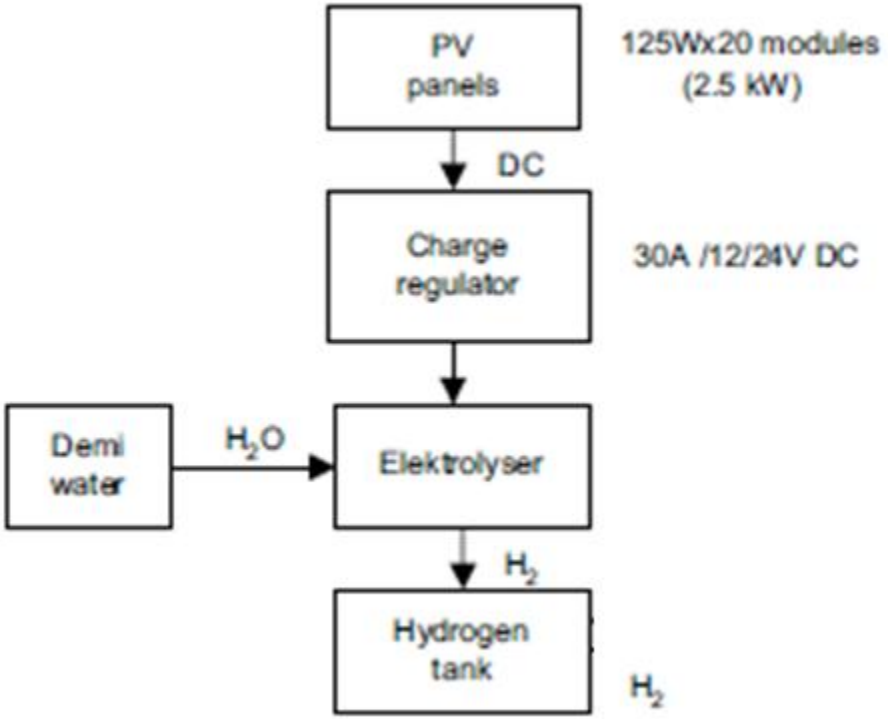
P(retificador) = (I x V)

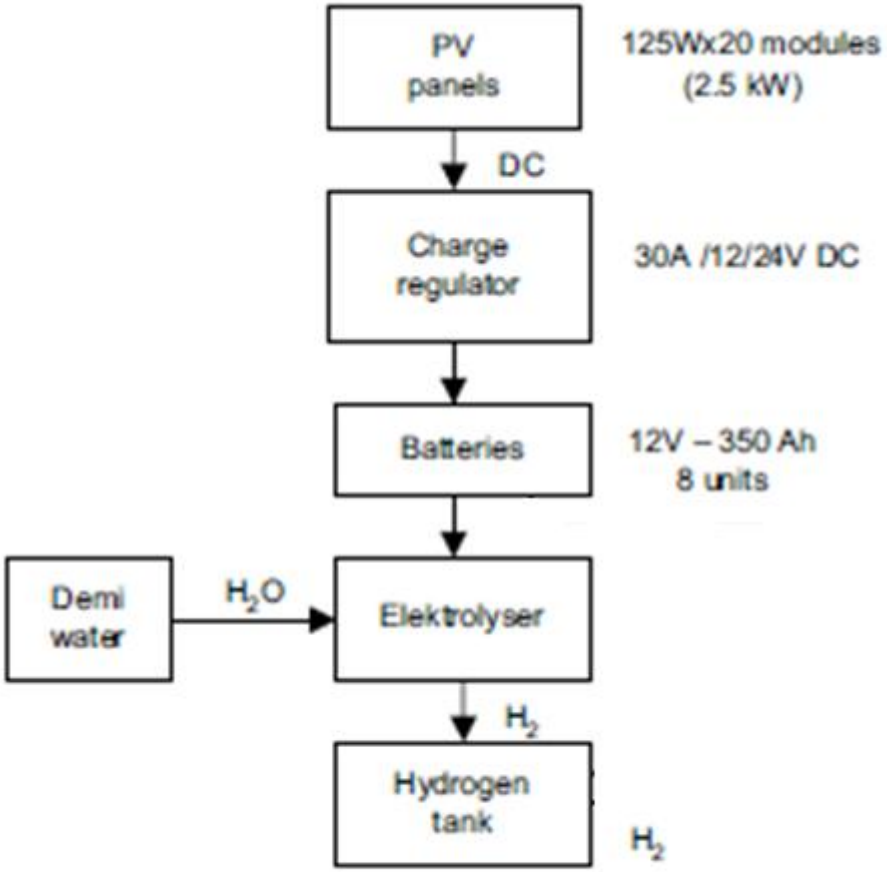
Fonte: E. P. da Silva, Eletrólise da Água, Seminário/Unicamp, 1990

H_2 AS AN ENERGETIC VECTOR



Exemplo:
Só produção de H2





Prod H2 2,5185Nm3 H2 dia

Table 9: Current performance of key hydrogen generation technologies

Application	Power or capacity	Ffficiency*	Initial investment cost	Life time	Maturity
Steam methane reformer, large scale	150-300 MW	70-85%	400-600 USD/kW	30 years	Mature
Steam methane reformer, small scale	0.15-15 MW	~51%	3 000-5 000 USD/kW	15 years	Demon-stration
Alkaline electrolyser	Up to 150 MW	65-82% (HHV)	850-1 500 USD/kW	60 000-90 000 hours	Mature
PEM electrolyser	Up to 150 kW (stacks) Up to 1 MW (systems)	65-78% (HHV)	1 500-3 800 USD/kW	20 000-60 000 hours	Early market
SO electrolyser	Lab scale	85-90% (HHV)	-	~1 000 h	R&D

Energia Elétrica

Retificador CA/CC

O2 - Atmosfera

H_2O

KOH

Eletrolisador

Selo Mecânico

Gasômetro

Tanque de
Baixa pressão

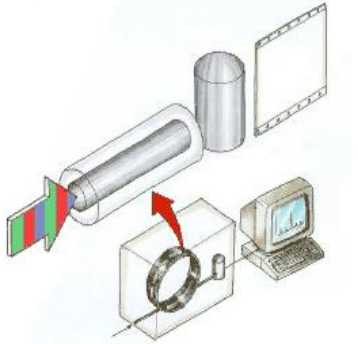
Compressor
Baixa Pressão

Catalisadores

Sistema de
Purificação

Amostragem

Análise
Cromatográfica



Compressor Alta
Pressão

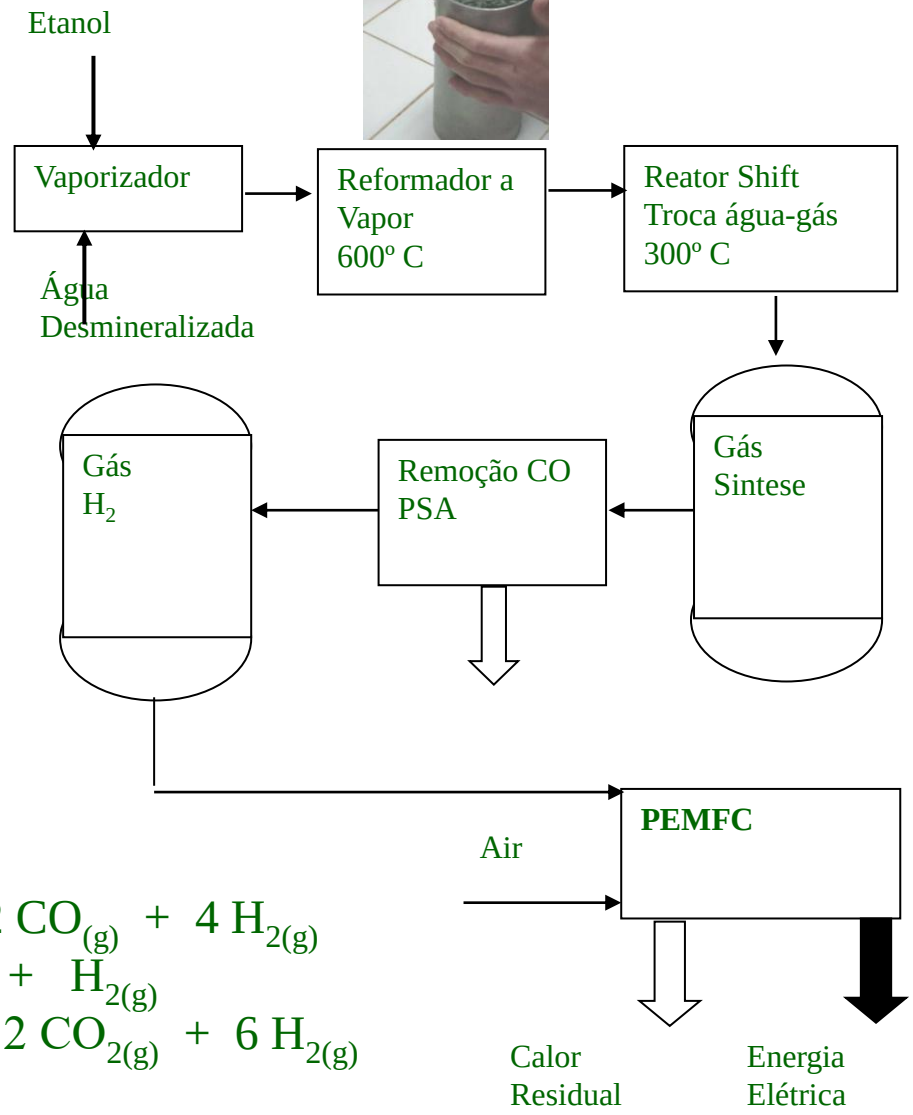
Cilindros

Fonte: Cemig/TE

Fonte: Cemig/TE

Reforma de Etanol:

- Possíveis rotas
- Por que reforma de Etanol?



Reforma a Vapor do Etanol

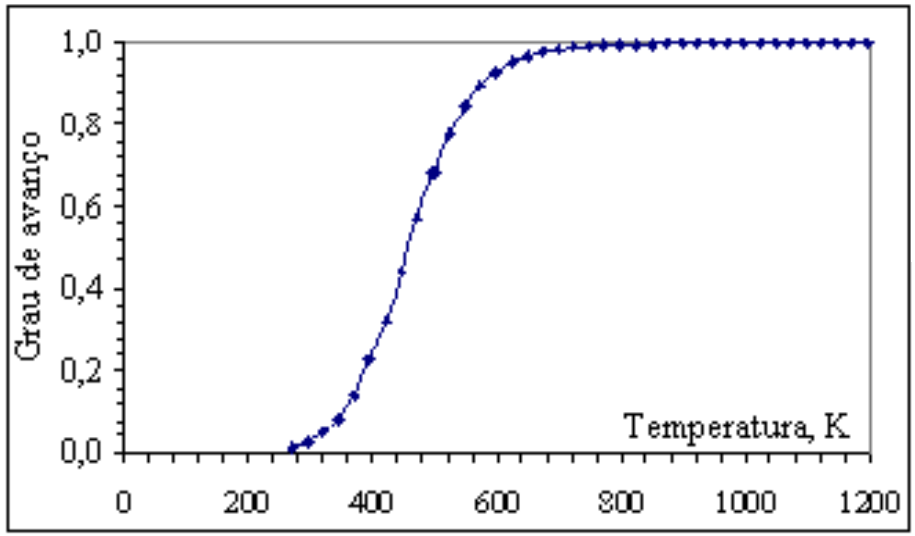
$$C_2H_5OH_{(V)} + H_2O_{(V)} \leftrightarrow 2\,CO_{(g)} + 4\,H_{2(g)}$$

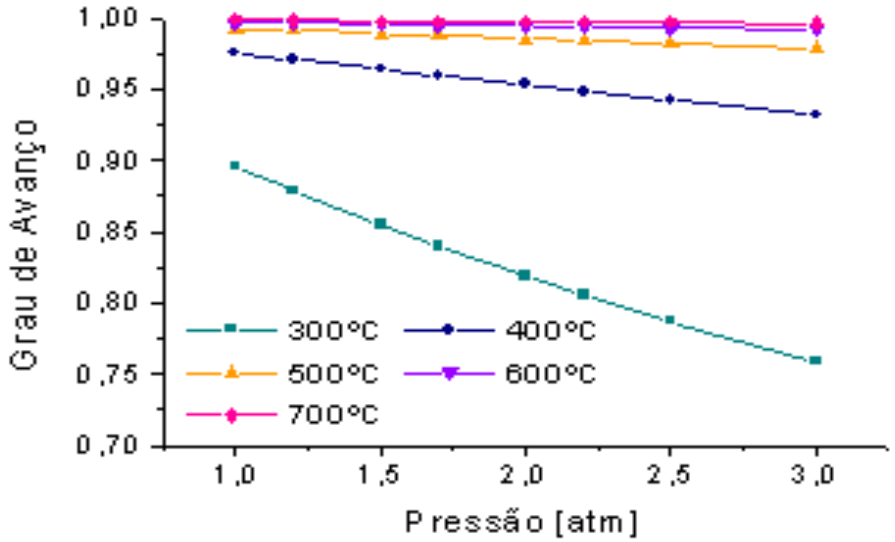
$$CO_{(g)} + H_2O_{(V)} \leftrightarrow CO_{2(g)} + H_{2(g)}$$

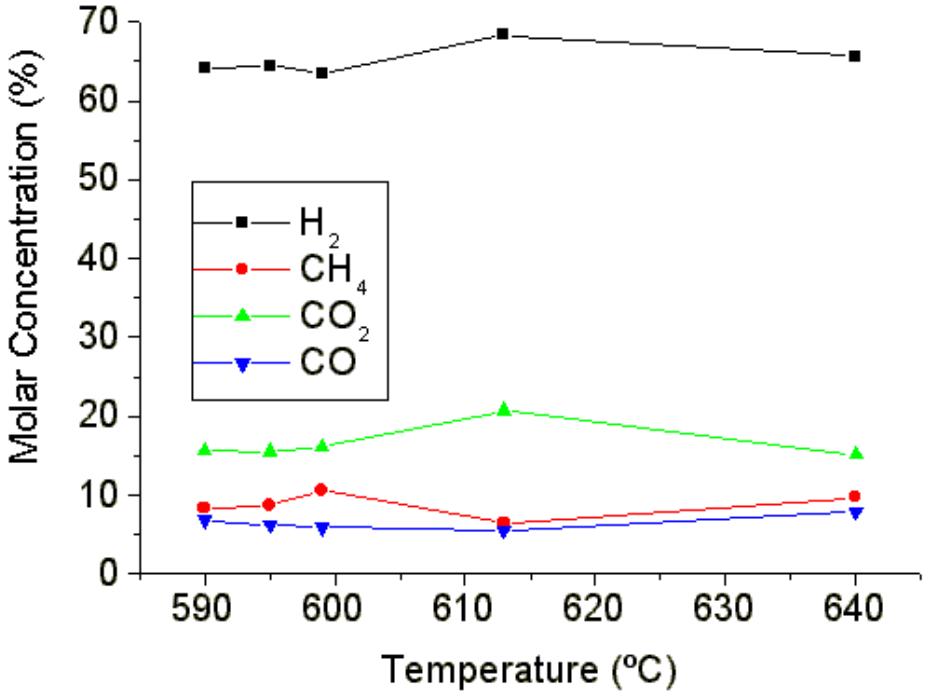
$$C_2H_5OH_{(V)} + 3\,H_2O_{(V)} \leftrightarrow 2\,CO_{2(g)} + 6\,H_{2(g)}$$

Fonte: Cemig/TE

Comportamento do Sistema:







Fonte: Cemig/TE

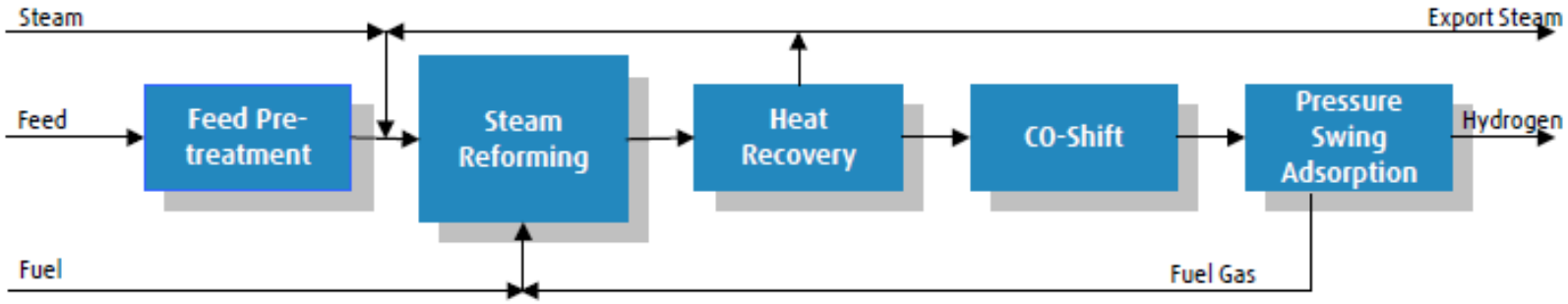
Reforma

Typical Basic Block Diagrams for H_2 Production

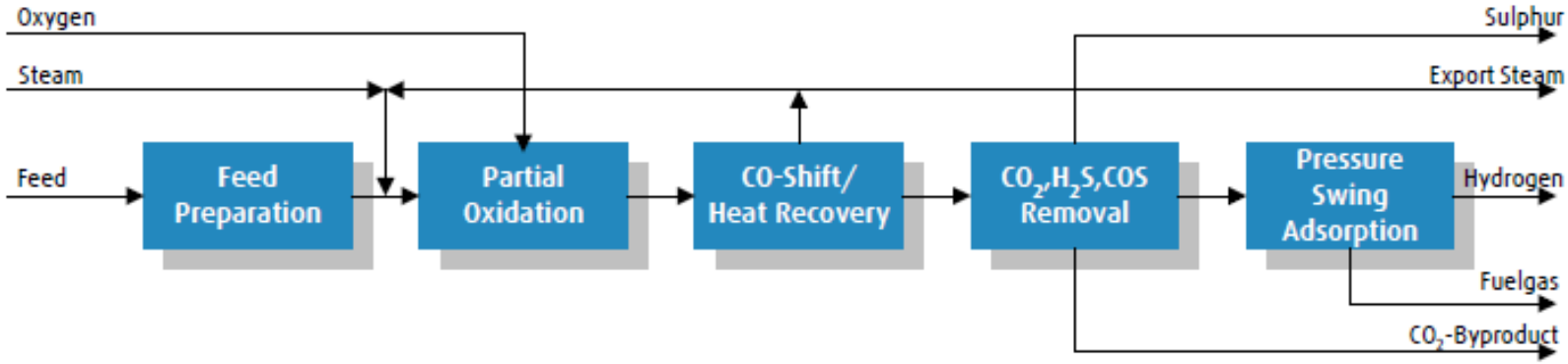
FuncHy
functional materials for mobile hydrogen storage

Linde Engineering
Linde

Light Hydrocarbons



Heavy Hydrocarbons

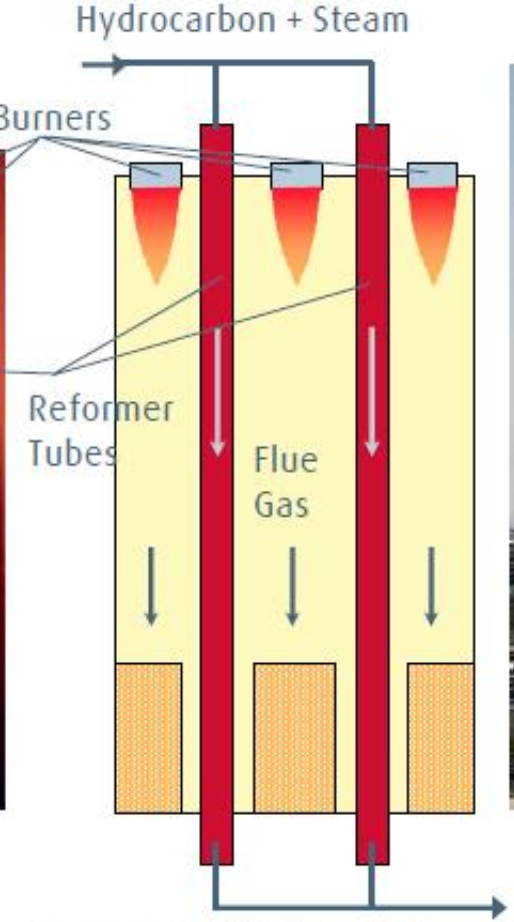


Reformador

Steam Reformer

FuncHy
functional materials for mobile hydrogen storage

Linde Engineering
Linde



Shift

CO-Shift Reactor

- Shifts undesired CO to H_2
  $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ exothermal
- Simple catalytic reactor
- CO conversion depends on Temperature
  High Temperature Shift: ~ 75 %
  Low Temperature Shift: ~ 90%
- H_2 in dry gas ~ 75 %

Purificação

- Pressure Swing Adsorption for high Purity H_2

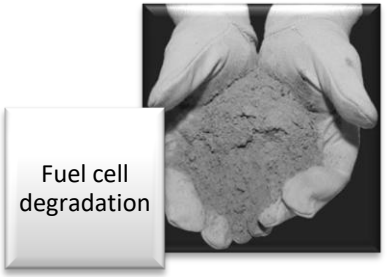
  based on selective adsorption using different kinds of adsorption materials (e.g. molecular sieves)

- H_2 Purity up to 99.9999 %
- H_2 Recovery up to 90 %

Hydrogen purity requirements

The proposed EC Directive on the deployment of an alternative fuels infrastructure sets out that:

"Hydrogen refuelling points shall comply with the relevant EN standard, to be adopted by 2014, and, pending publication of this standard, with the technical specifications included in the ISO 14687-2 standard."



Impurity	Amount fraction limit (ppm)
Water	5
Total hydrocarbons	2
Oxygen	5
Helium	300
Nitrogen	100
Argon	100
Carbon dioxide	2
Carbon monoxide	0.2
Total sulphur compounds	0.004
Formaldehyde	0.01
Formic acid	0.2
Ammonia	0.1
Total halogenated compounds	0.05

NPL's analysers

Quartz crystal microbalance

Gas chromatography with thermal conductivity detector

Water

Helium

Gas chromatography with mass spectrometer detector (or cavity ringdown spectroscopy)

Formaldehyde

Under development…

Formic acid

Ammonia

Hydrocarbons

Carbon dioxide

Methane

Carbon monoxide

Gas chromatography with methaniser and flame ionisation detector (backflush capability for hydrocarbons)

Oxygen

Nitrogen

Argon

Gas chromatography with pulsed discharge helium ionisation detector

Sulphur Compounds

Gas chromatography with sulphur chemiluminescence detector

H_2 Purificação

Purificação: para eliminação de pequenas quantidades de substâncias indesejadas aos processo consumidores de hidrogênio, e aumento da produtividade destes processos, etapas de purificação são empregadas para que purezas de até 99,9999% (H_2 6.0), ou superiores, sejam alcançadas.

Absorção
-60°C – 50°C
5 – 250 bar

Lavagem com N_2 Líquido
-200°C
5 – 250 bar

Purificação Catalítica
80 – 400°C
5 – 80 bar

Getter
100 – 400°C
Qualquer faixa de pressão

PSA (Pressure Swing Adsorption)
Temperatura Ambiente
5 – 20 bar

Difusão Seletiva em Membranas Orgânicas ou Mistas
Temperatura Ambiente
5 – 80 bar

Percolação em Membranas Inorgânicas
100 – 550°C
5 – 20 bar

Reformador autotérmico de etanol:

- Consumo de etanol = 9 a 10 L / kg H_2
- Água filtrada (3 filtros internos);
- Produção de H_2 = 0,4 kg/h;
- H_2 de grau 4.0 (99,99%)
- CO < 30 ppm;
- Purificação via PSA;
- Temperatura de ~ 650°C;
- Totalmente automatizado (CLP);
- Custo do protótipo desse projeto ~ R$ 250.000,00

Silva e Cavaliero, 2007

Generations of Nuclear Energy

Generation I

Early Prototypes

- Shippingport
- Dresden
- Magnox

Generation II

Commercial Power

- PWRs
- BWRs
- CANDU

Generation III

Advanced LWRs

- CANDU 6
- System 80+
- AP600

Generation III+

Evolutionary Designs

- ABWR
- ACR1000
- AP1000
- APWR
- EPR
- ESBWR

Generation IV

Revolutionary Designs

- Safe
- Sustainable
- Economical
- Proliferation Resistant and Physically Secure

1950 1960 1970 1980 1990 2000 2010 2020 2030

Gen I | Gen II | Gen III | Gen III+ | Gen IV

Coprodução de Hidrogênio

Overview of the Generation IV Systems

System	Neutron Spectrum	Fuel Cycle	Size (MWe)	Applications	R&D Needed
Very-High-Temperature Reactor (VHTR)	Thermal	Open	250	Electricity, Hydrogen, Process Heat	Fuels, Materials, H_2 production
Supercritical-Water Reactor (SCWR)	Thermal, Fast	Open, Closed	1500	Electricity	Materials, Thermal-hydraulics
Gas-Cooled Fast Reactor (GFR)	Fast	Closed	200-1200	Electricity, Hydrogen, Actinide Management	Fuels, Materials, Thermal-hydraulics
Lead-Cooled Fast Reactor (LFR)	Fast	Closed	50-150 300-600 1200	Electricity, Hydrogen Production	Fuels, Materials
Sodium Cooled Fast Reactor (SFR)	Fast	Closed	300-1500	Electricity, Actinide Management	Advanced recycle options, Fuels
Molten Salt Reactor (MSR)	Epithermal	Closed	1000	Electricity, Hydrogen Production, Actinide Management	Fuel treatment, Materials, Reliability

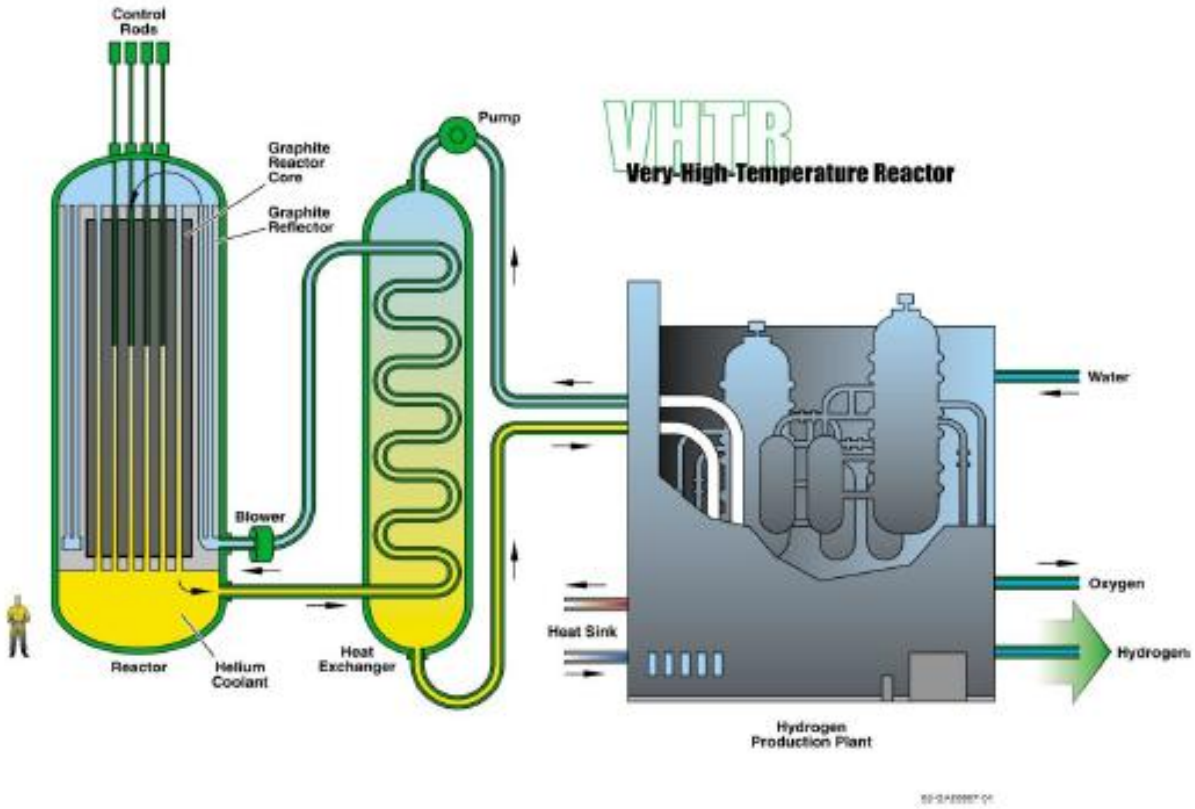
Very-High-Temperature Reactor (VHTR)

Characteristics

- He coolant
- >900C outlet temperature
- 250 MWe
- Coated particle fuel in either pebble bed or prismatic fuel

Benefits

- Hydrogen production
- Process heat applications
- High degree of passive safety
- High thermal efficiency option



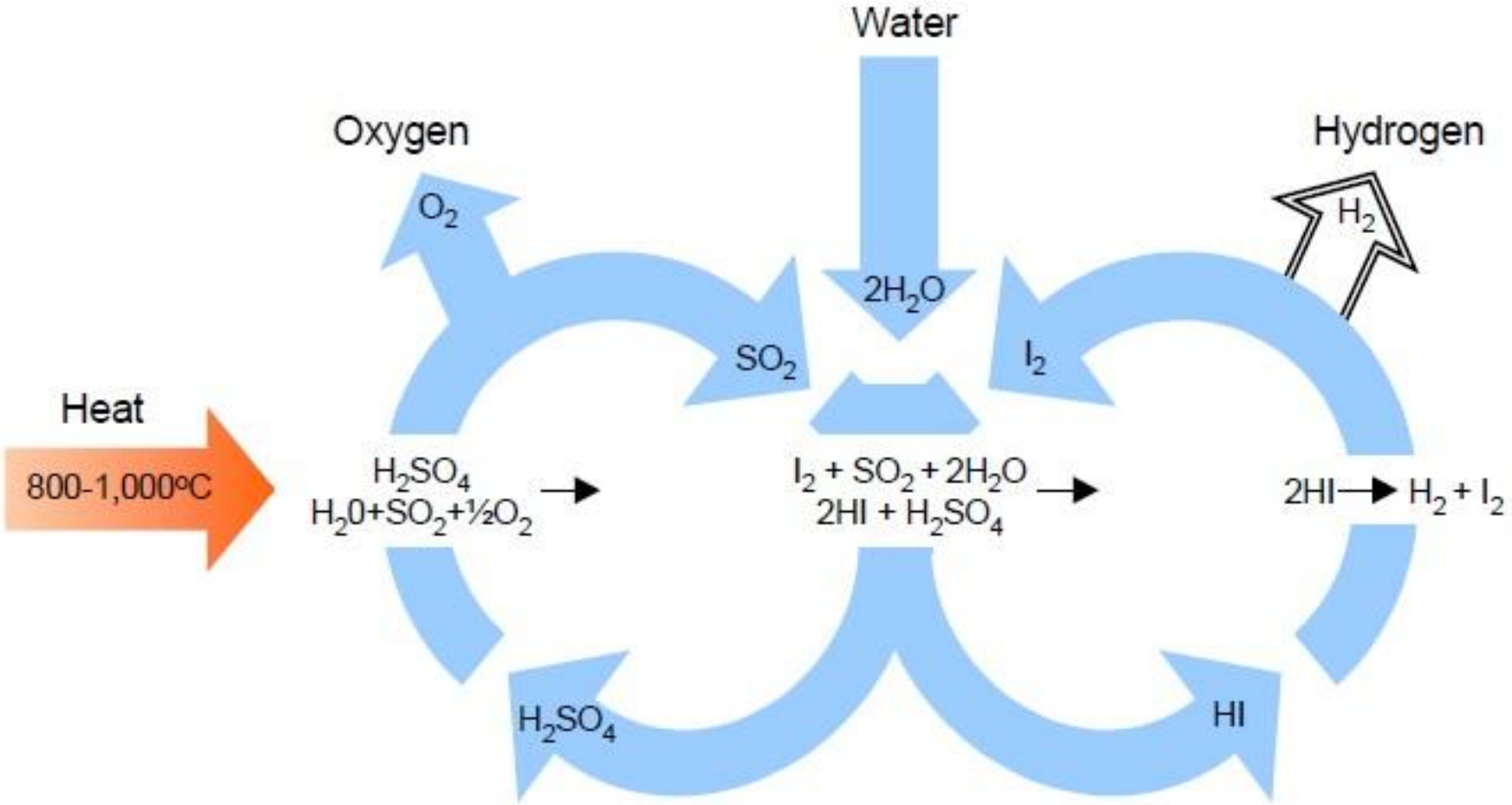
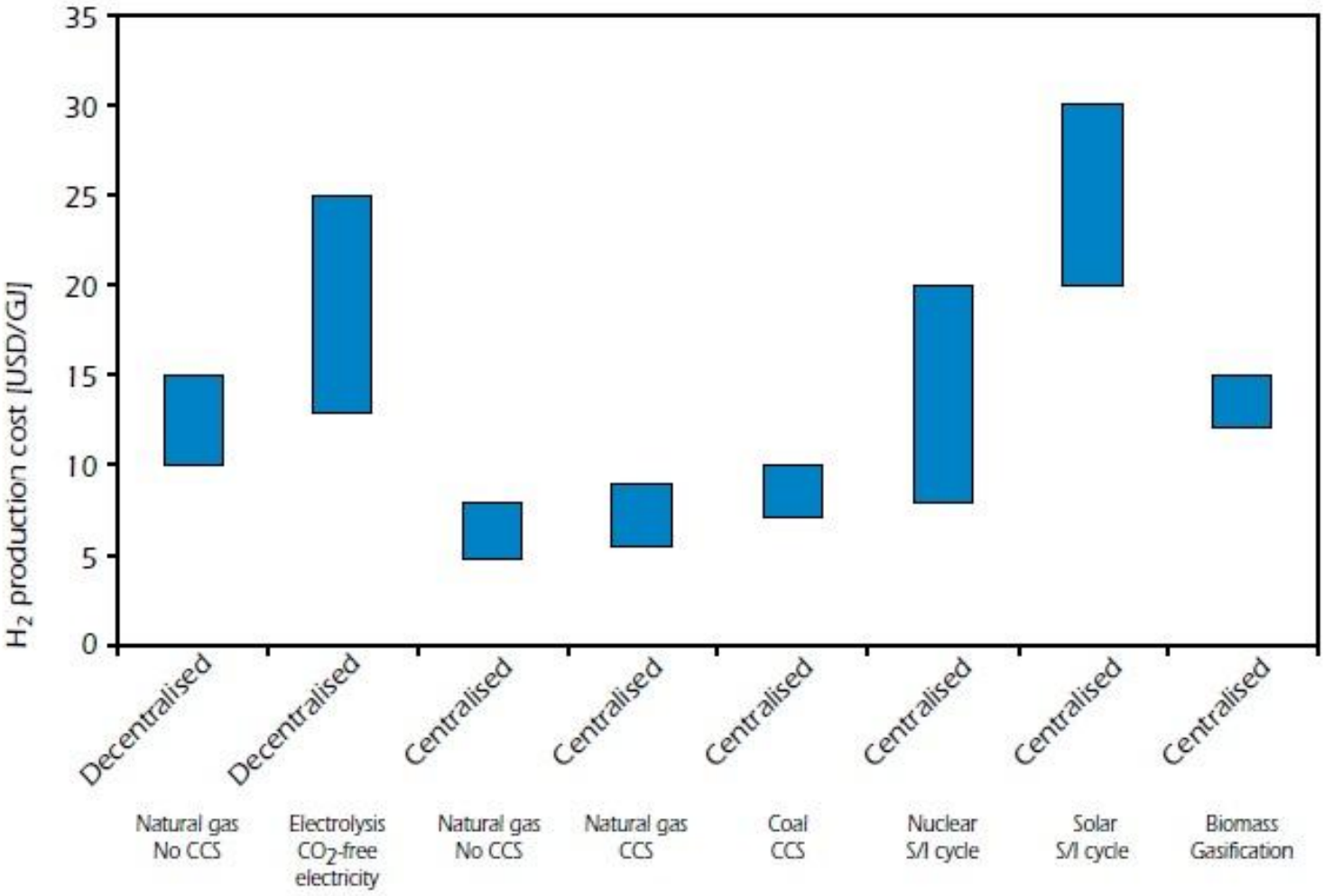

Water
Oxygen
Hydrogen
O_2
H_2
$2H_2O$
SO_2
I_2
Heat
800-1,000ºC
H_2SO_4
$H_20+SO_2+½O_2$
$I_2 + SO_2 + 2H_2O$
$2HI + H_2SO_4$
$2HI \rightarrow H_2 + I_2$
H_2SO_4
HI

Figure 2.10

Hydrogen production cost projection



Esses custos atendem a realidade do Brasil??

Armazenamento de Hidrogênio

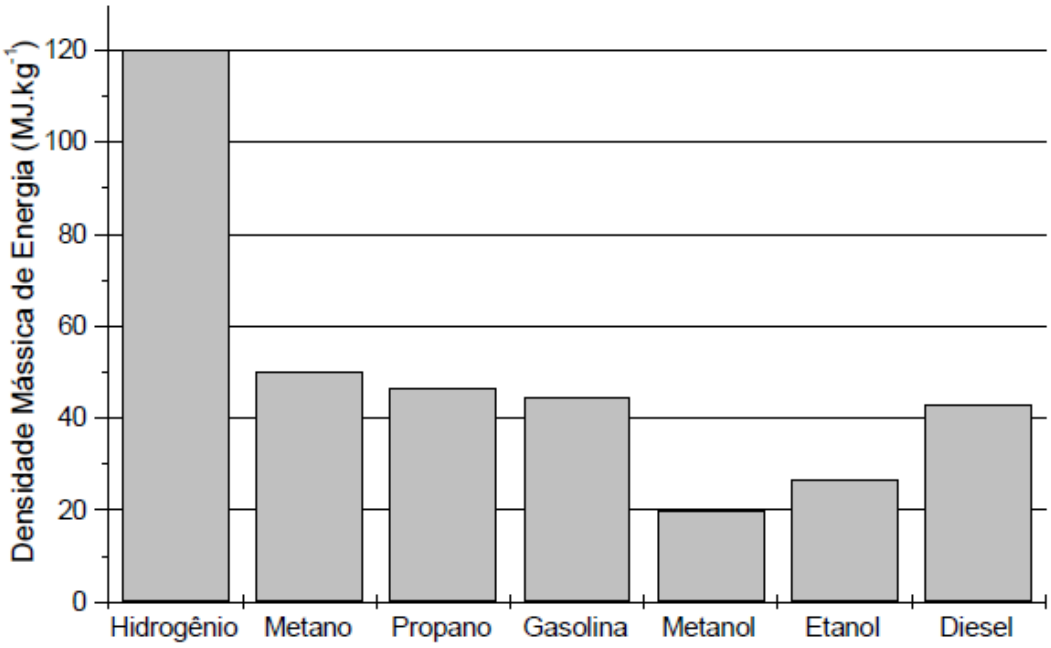
Hidrogênio: Armazenamento

ESTADO	ARMAZENAMENTO
GASOSO (H_2 comprimido)	tubulação de gasodutos
	Gasômetros
	cilindros e vasos pressurizados
	poços de petróleo e gás esgotados
	cavernas e lençóis aqüíferos
LIQUIDO (H_2 Líquido)	reservatórios de pequeno, médio e grande portes (de algumas centenas até milhões de litros)
COMPOSTOS INTERMEDIÁRIOS	H2 em esponjas (hidretos metálicos, nanotubos e nanofibras de carbono, microesferas de vidro e polímeros com propriedades especiais)
	H2 em Tetraborohidreto de Sódio
	Mistura com Gás Natural

Fonte: Silva, E. P. (2008)

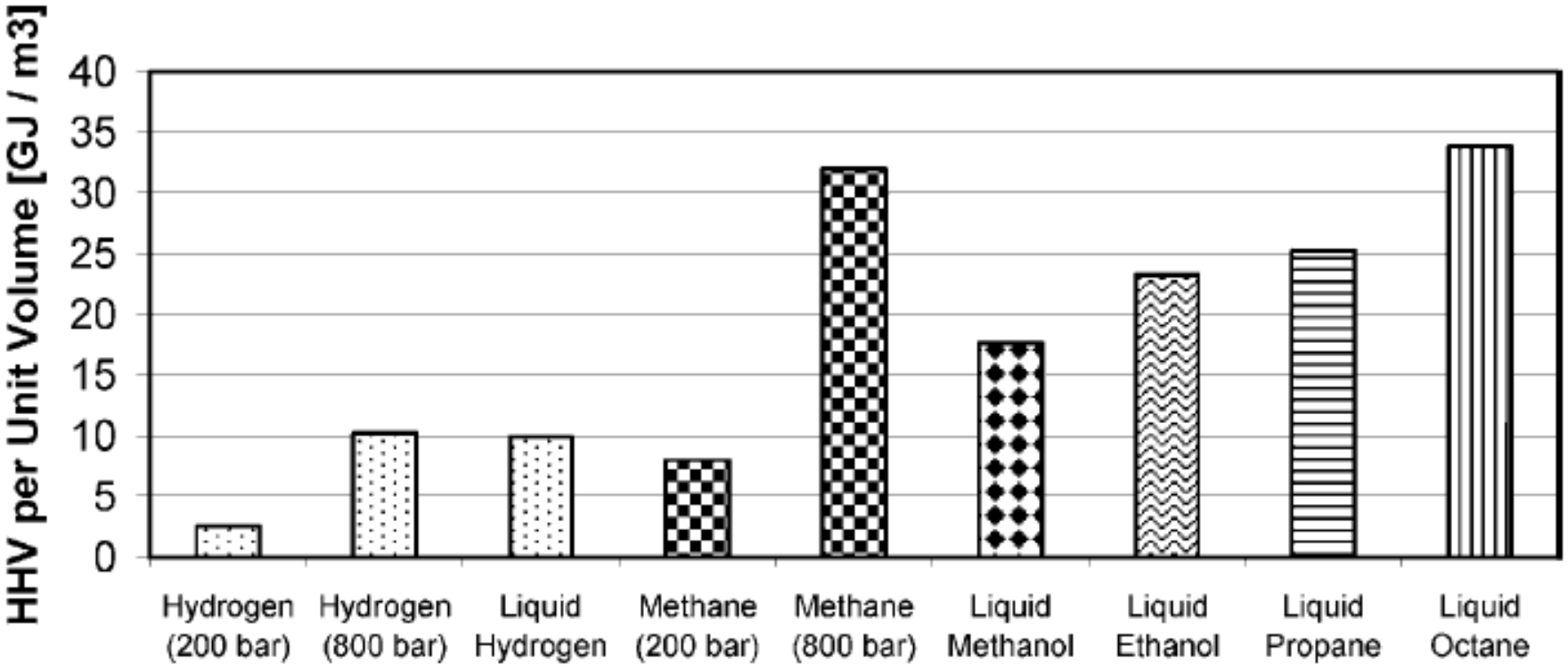
Características do hidrogênio

Densidade energética do H_2 por massa $MJ.kg^{-1}$



Fonte: LH2 UNICAMP

Poder Calorífico por Volume



Bossel, 2006

Table 5.6 Liquids that might be used to locally store hydrogen gas for fuel cells

Name	Formula	Percent H_2	Density, $kg.L^{-1}$	Vol. (l) to store 1 kg H_2	Notes
Liquid H_2	H_2	100	0.07	14	Cold, −252°C
Ammonia	NH_3	17.8	0.67	8.5	Toxic, 100 ppm
Liquid methane	CH_4	25.1	0.415	9.6	Cold, −175°C
Methanol	CH_3OH	12.5	0.79	10	
Ethanol	C_2H_5OH	13.0	0.79	9.7	
Hydrazine	N_2H_4	12.6	1.01	7.8	Highly toxic
30% sodium borohydride solution	$NaBH_4 + H_2O$	6.3	1.06	15	Expensive, but works well

Comparativo por massa

Figure 1 Volume of 4 kg of hydrogen compacted in different ways, with size relative to the size of a car. (Image of car courtesy of Toyota press information, 33rd Tokyo Motor Show, 1999.)

Louis Schlapbach*† & Andreas Züttel†, 2001

Armazenamento de hidrogênio

Hidrogênio gasoso

- Havendo vazamento de alta pressão, o cilindro torna-se um "torpedo". Sendo provável também a auto-ignição.
- Reguladores de pressão e *flame traps* são montados nos cilindros para prevenir ignição do hidrogênio.
- Vantagens desse tipo de armazenamento: simplicidade, tempo de estocagem indefinido.
- Desvantagens: a compressão é energo-intensiva:

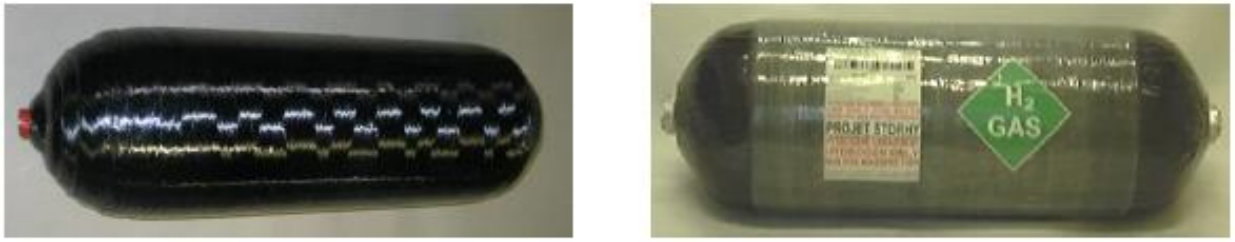
Inlet-Outlet(psig)	Adiabatic Efficiency	Compression Energy
300 - 1,000	70-80%	0.6 - 0.7 kWh_e/kg
100 - 7,000	50-70%	2.6 - 3.6 kWh_e/kg

1 kg H2 = 39,40 kWh

39,4 – 0,7 = 38,7

39,4 – 3.6 = 35,8

Se houver restrição de peso, também será um problema!

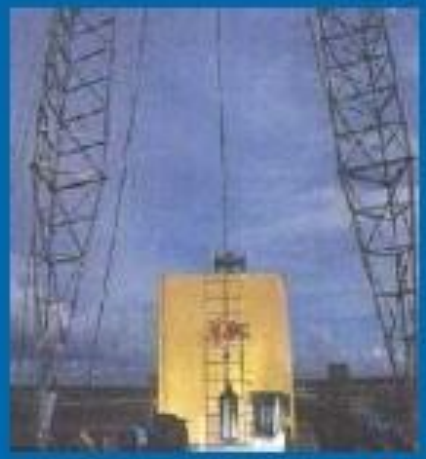


(a) (b)

Figure 22. 700 bar cylinder prototypes developed and tested within the STORHY European project: (a) Type III technology, (b) Type IV technology.

Extensive Research

Bonfire Test



Crash Tests

Assessment after Drop Test

Vibration Test

Permeation Test

Hidrogênio Líquido

- Não se liquefaz até -253°C
- 40% da energia é perdida
- Alta densidade por massa

1 kg H2 = 39,40 kWh
60% → 23,64 kWh

Moore, 2004

Armazenamento de hidrogênio

Hidrogênio líquido (criogênico)

- O processo de liquefação é energo-intensivo (12,5 – 15 $kWh.kg^{-1}$). Unidades modernas (>1000 $kg.h^{-1}$) consomem cerca de 25% do poder calorífico do H_2. Unidades pequenas (100 $kg.h^{-1}$) chega a 45%!

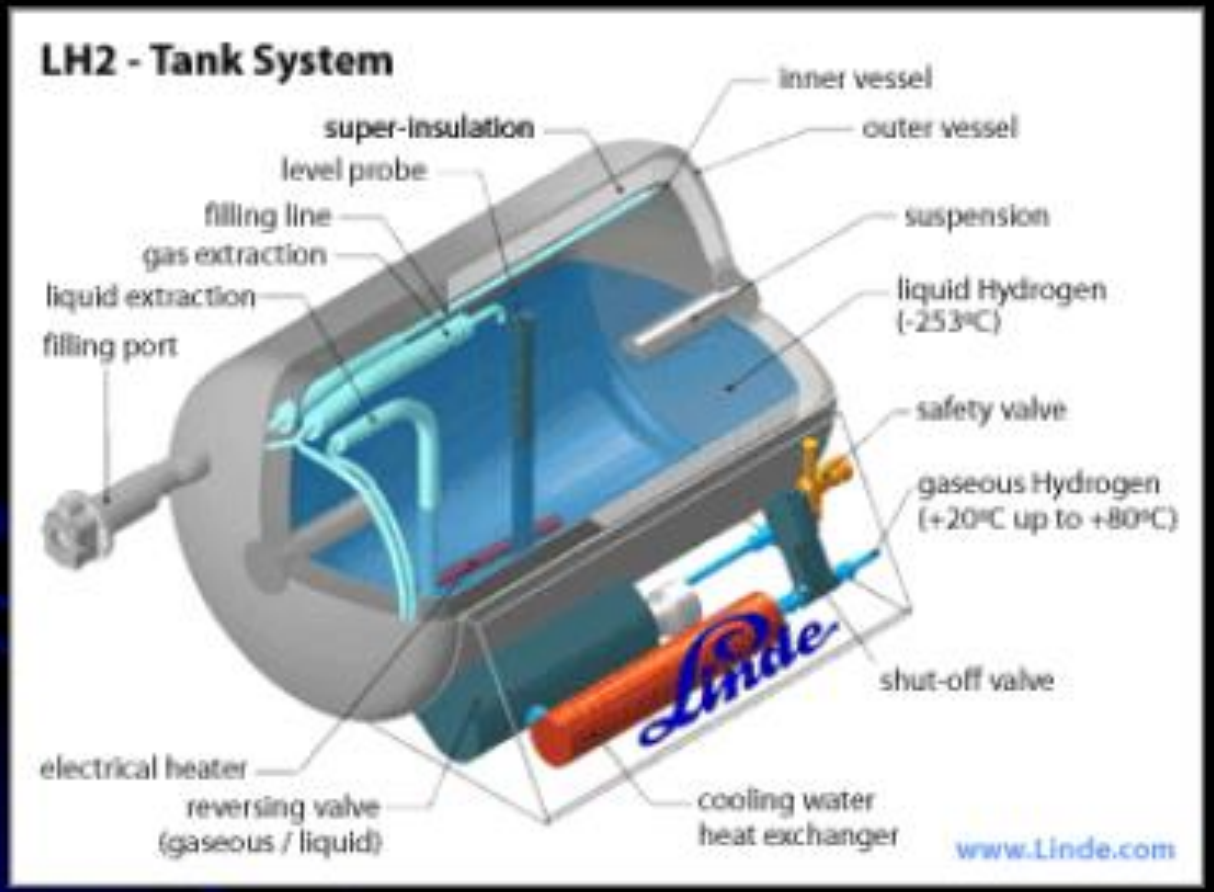
- O gás primeiramente é comprimido e resfriado a cerca de 78 K com N_2 líquido.

- O gás a alta pressão é então expandido em uma turbina, onde, pelo efeito Joule – Thompson, ocorre mais um resfriamento.

Fonte: Larminie & Dicks

Armazenamento de hidrogênio

Hidrogênio líquido (criogênico)



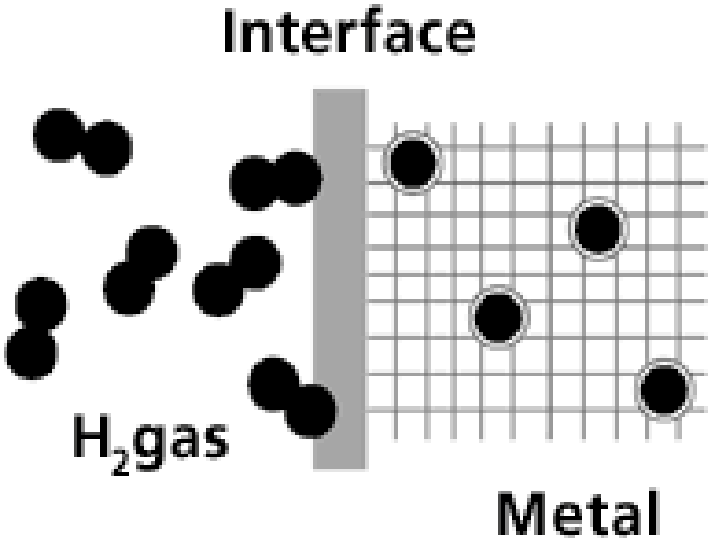
Fonte: Linde

Armazenamento de hidrogênio

Hidrogênio líquido LH_2 (criogênico)

Massa do tanque vazio	51,5 kg
Massa de hidrogênio estocado	8,5 kg
Rendimento (% mass H_2)	14,2%
Energia específica	5,57 $kWh.kg^{-1}$
Volume do tanque	120 L
Massa de H_2 por litro	0,071 $kg.L^{-1}$

Hidretos Metálicos



- Certos metáis e ligas pode absorver o Hidrogênio
- Hidrogênio liberado de metal quando o calor é aplicado

$$M + H_2 \leftrightarrow MH_2$$

O H_2 é suprido para a liga metálica no interior do cilindro, a reação acima desloca-se para a direita e o hidreto é formado. A reação é levemente exotérmica.

Moore, 2004

Armazenamento de hidrogênio

Hidretos metálicos

- Uma das principais vantagens do hidreto é a segurança, uma vez que o hidrogênio é armazenado em baixa pressão.
- A baixa pressão simplifica o projeto do sistema de suprimento de H_2.
- Interessante em aplicações onde pequenas quantidades de H_2 precisam ser armazenadas.

Armazenamento de hidrogênio

Hidretos metálicos

- Aplicável também em sistemas onde o peso não é problema mas o espaço é. Ex: barcos.
- A desvantagem é particularmente notável onde grandes quantidades de H_2 precisam ser estocadas, ex: em veículos.
- Tempo Típico de abastecimento é de 1 h para um tanque de aprox. 5 kg.

Armazenamento de hidrogênio

Nome	Fórmula	H_2 wt%	$Kg.L^{-1}$	Vol (L) 1 kg H_2	T_C °c
LH_2	H_2	100	0,07	14	-
Hidreto de Lítio	LiH	12,68	0,82	6,5	-
Hidreto de Alumínio	AlH_3	10,8	1,3	7,1	100
Hidreto de Titânio	TiH_2	4,4	3,9	5,8	-
Hidreto de Ferro Titânio	$TiFeH_2$	1,87	5,47	9,8	-
Hidreto de Paládio	Pd_2H	0,471	10,78	20	-
Boro hidreto de Lítio	$LiBH_4$	18,51	0,666	8,1	350

Tanque de $TiFeH_2$ → (8,8 kg de H_2) → 454 kg
Tanque de AlH_3 → 78,7 kg

Fonte: Larminie & Dicks

- Os principais desafios para os tanques de hidreto são: cinética de adsorção/liberação de H_2, a capacidade volumétrica do tanque e peso.

Tabela 2.2 – Características das diferentes tecnologias de armazenamento de hidrogênio

Especificação	Tanques pressurizados	Tanques criogênicos	Hidretos metálicos
Densidade de energia por unidade de massa ($MJ \cdot kg^{-1}$)	0,9 ~ 8,1	15 ~ 45	0,9 ~ 3,5
Densidade de energia por unidade de volume ($MJ \cdot m^{-3}$)	700 ~ 3600	4000 ~ 5000	12800 ~ 13800
Eficiência global (%)	80 ~ 92	62 ~ 77	90 ~ 94
Fração mássica (%)	3 ~ 10	> 10	1 ~ 7
Pressão (bar)	200 ~ 700	1,0 ~ 1,2	2 ~ 60
Taxa de auto descarga ($\% \cdot dia^{-1}$)	< 0,00003	0,3 ~ 1,0	desprezível

Fonte: Compilação de dados de Di Profio et al. (2009), Linardi (2010), Ozaki et al. (2014) e Revankar e Majumdar (2014).

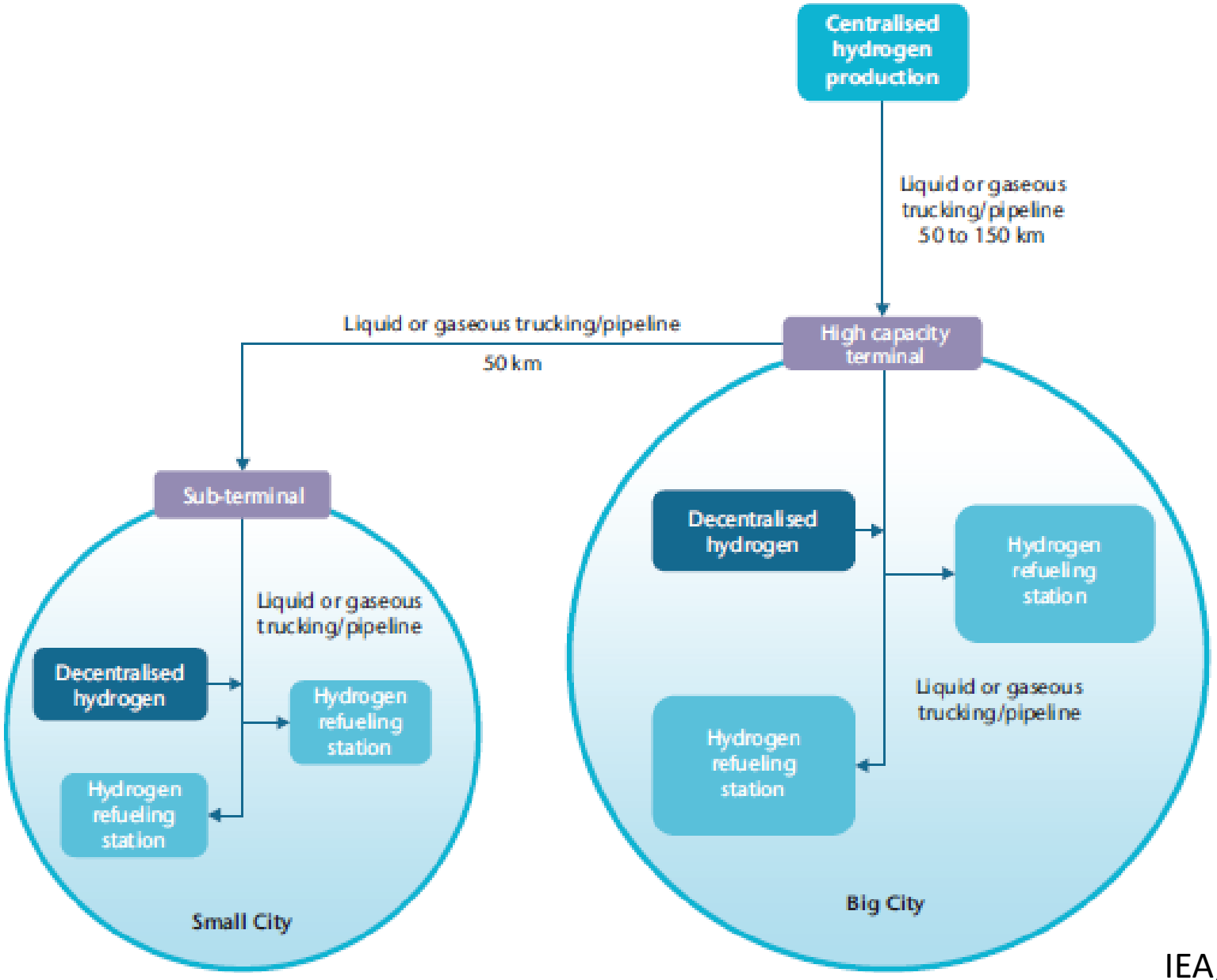
Mas tem problema PESO

Após Eletrólise: 39,40 kWh/kg H2

31,52 – 36,2 kWh/kg H2

23,64- 30,3 kWh/kg H2

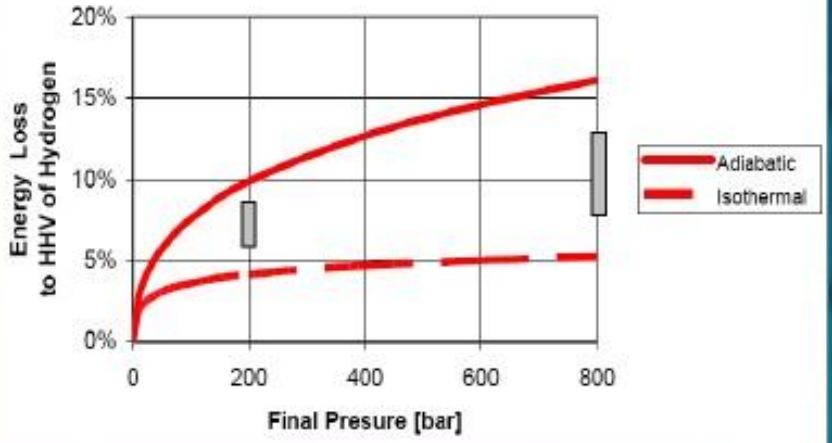
35,4 – 37,0 kWh/kg H2


Centralised hydrogen production
Liquid or gaseous trucking/pipeline 50 to 150 km
Liquid or gaseous trucking/pipeline 50 km
High capacity terminal
Sub-terminal
Liquid or gaseous trucking/pipeline
Decentralised hydrogen
Hydrogen refueling station
Hydrogen refueling station
Small City
Decentralised hydrogen
Hydrogen refueling station
Liquid or gaseous trucking/pipeline
Hydrogen refueling station
Big City

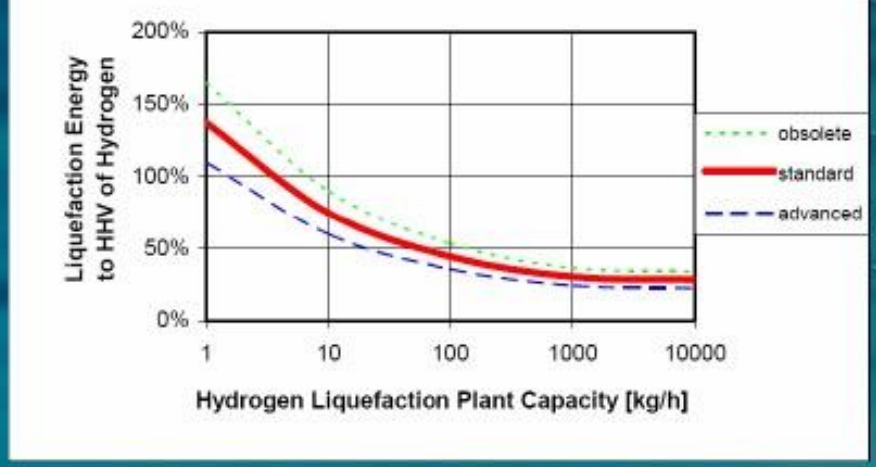
IEA, 2015

PERDAS NA MANIPULAÇÃO DO H_2

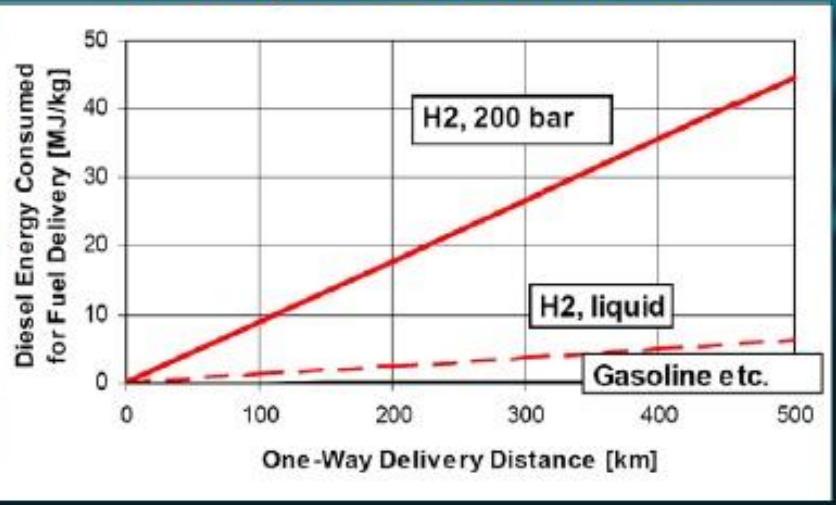
Compressão



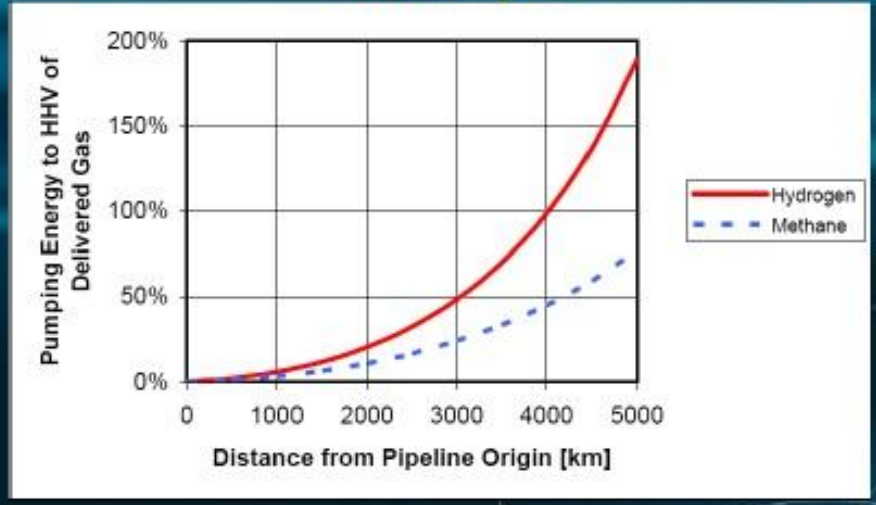
Liquefação



Transporte rodoviário



Tubulação



1 **kWh/kg** = 3,6 **MJ/kg**

Desafios

Normas ISO

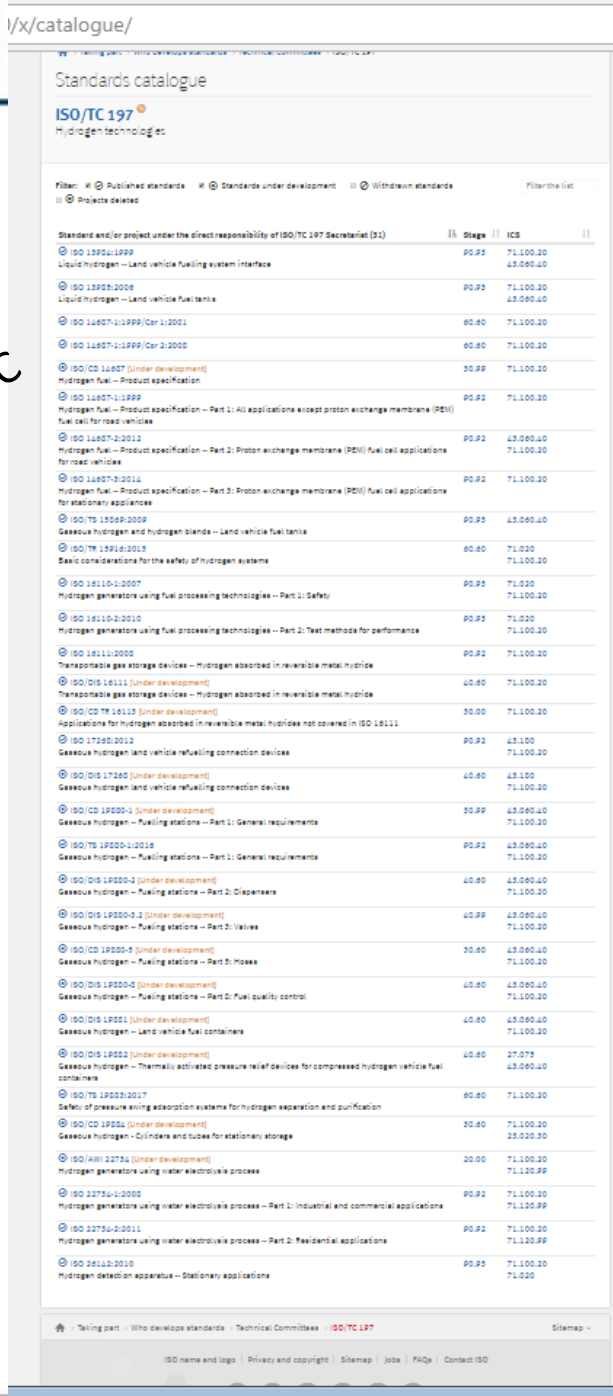
Reference	Title
ISO/TC 197/TAB 1	Technical Advisory Board
ISO/TC 197/WG 5	Gaseous hydrogen land vehicle refuelling connection devices
ISO/TC 197/WG 15	Gaseous hydrogen - Cylinders and tubes for stationary storage
ISO/TC 197/WG 17	Pressure swing adsorption system for hydrogen separation and purification
ISO/TC 197/WG 18	Gaseous hydrogen land vehicle fuel tanks and TPRDs
ISO/TC 197/WG 19	Gaseous hydrogen fueling station dispensers
ISO/TC 197/WG 20	Gaseous hydrogen fueling station valves
ISO/TC 197/WG 21	Gaseous hydrogen fueling station compressors
ISO/TC 197/WG 22	Gaseous hydrogen fueling station hoses
ISO/TC 197/WG 23	Gaseous hydrogen fueling station fittings
ISO/TC 197/WG 24	Gaseous hydrogen fueling stations – General requirements
ISO/TC 197/WG 25	Hydrogen absorbed in reversible metal hydride
ISO/TC 197/WG 26	Hydrogen generators using water electrolysis
ISO/TC 197/WG 27	Hydrogen fuel quality
ISO/TC 197/WG 28	Hydrogen quality control

Joint working groups under the responsibility of another committee

Reference	Title
ISO/TC 158/JWG 7	Joint ISO/TC 158 - ISO/TC 197 WG: Hydrogen fuel analytical methods

https://www.iso.org/committee/54560/x/catalogue/

Várias normas Associadas a FC



ABNT/CEE-067 - Comissão de Estudo Especial de Tecnologias de Hidrogênio

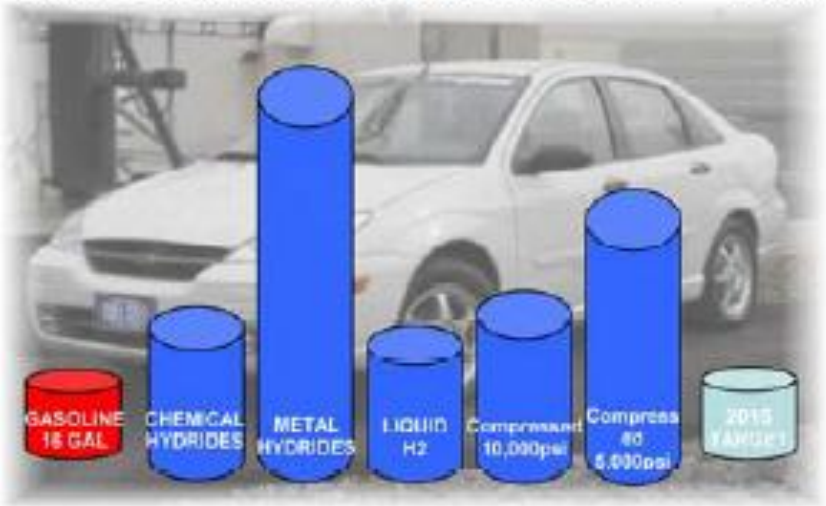
Esta comissão é espelho do ISO/TC 197 – *Hydrogen Technologies* e trata de Pilhas ou Células a Combustível de Hidrogênio do IEC/TC 105 (conforme acordado com o ABNT/CB-003)

Desafios para a Economia do Hidrogênio

Desafios Tecnológicos:

- Armazenagem de hidrogênio (>480 km)
- Custo de produção de hidrogênio($1.50 - 2.00 por geg)
- Custo da célula a combustível
- (<$50 por kW)

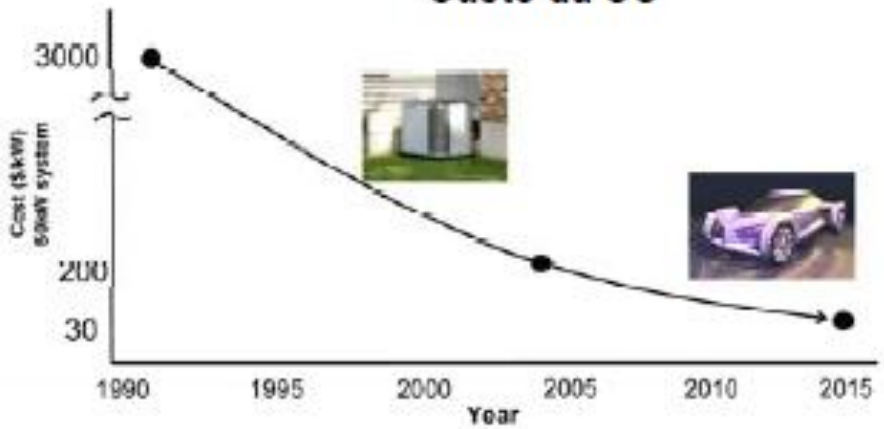
Volume de armazenagem para distâncias > 480 km



Usar como premissas para exercício de viabilidade

- Segurança, códigos e normas (Competição global e segurança)
- Entrega do Hidrogênio(Investimentos para nova infraestrutura de distribuição)
- Educação

Custo da CC



*Assumes high volume production (500,000 units/yr)

galão equivalente a gasolina (GEG) é a quantidade de combustível alternativo necessária para igualar o conteúdo de energia de um galão líquido de gasolina . Galão de gasolina equivalente - https://pt.qaz.wiki/wiki/Gasoline_gallon_equivalent

Questões para VE

- Infraestrutura
  - Estações de reabastecimento
  - Distribuição e logística ao consumidor
- Custos
- Custo de carbono na produção de H2
- Autonomia (~260 miles)
- Tempo de partida (~5 minutes)

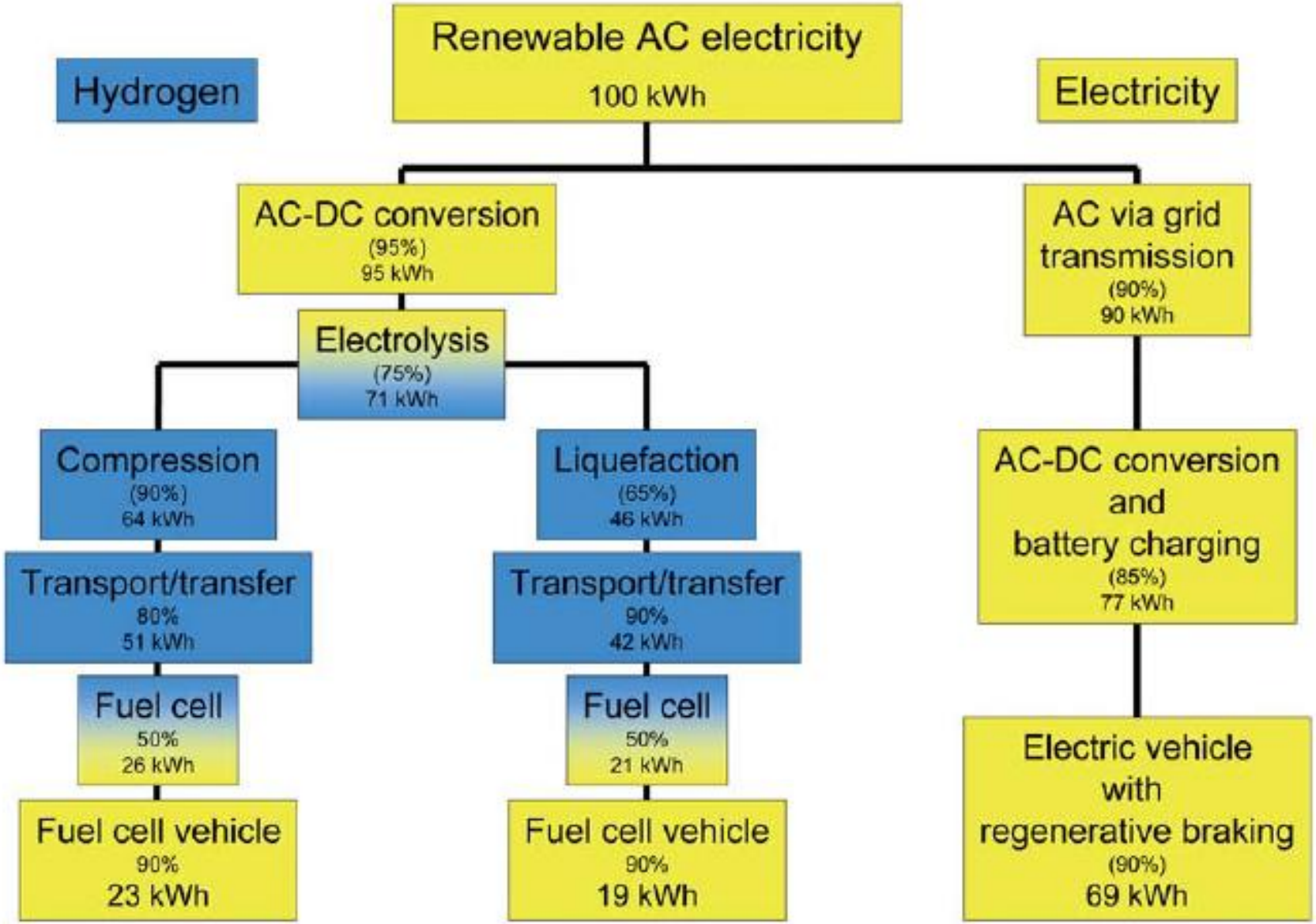
Characteristic Requirements of Transportation vs. Stationary Applications

Characteristic	Transportation	Stationary
Max Power	50 - 100 kW	2 - 200 kW (Multi unit housing)
Design Life	5,000 hours	50,000 hours
Cost	$50 - 100/ kW	$300 - 1000/ kW
Electrical Output	High Voltage AC or DC	48 V DC to 220 V AC
Efficiency	Very High	Very High
Power Range	20 to 1	10 to 1
Power Density (Volume)	Very High	Moderate
Specific Power (Weight)	Very High	Moderate
Operation	Intermittent	Continuous (24/7)
Energy Storage	Possibly	Possibly
Transient Response	1/10 of seconds	1/1000 of seconds
Short Term Fuel	Gasoline and diesel	Natural Gas/Propane
Long Term Fuel	Hydrogen	Hydrogen

Table 3.5

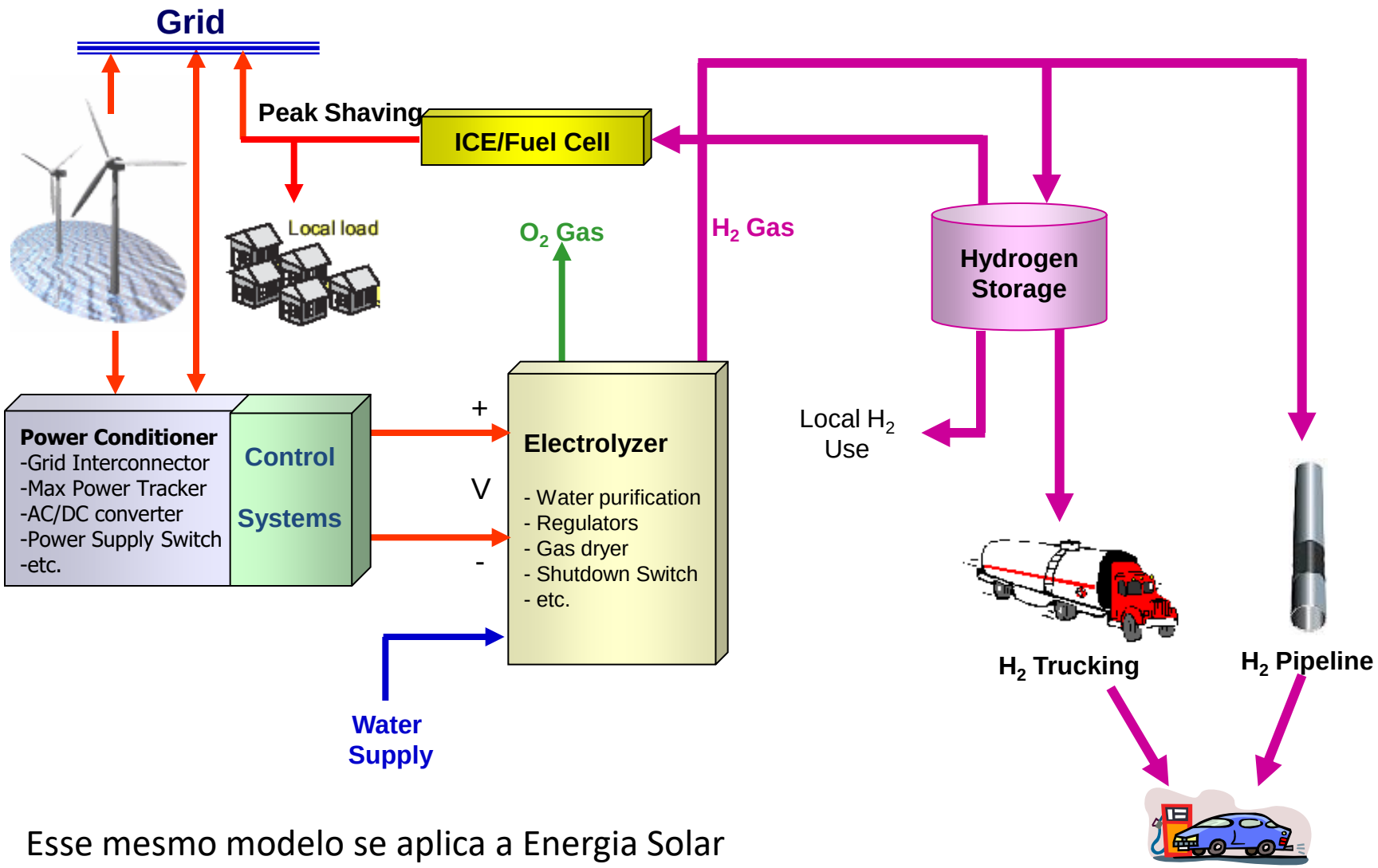
Estimated costs of a hydrogen fuel cell vehicle (80kW FCV)

	2005	2010	2030 Optimistic reduction	2030 Optimistic, but slower	2030 Pessimistic reduction
PEM fuel cell stack (USD/kW)	1 800	500	35	65	75
Gaseous hydrogen storage at 700 bar (USD/kg)	1 000	500	225	375	500
DME reformer (USD/kW net)	300	150	65	75	75
Gasoline ICE (USD/kW)	30	30	30	30	30
3-way catalyst (USD/unit)	430	430	430	430	430
Gaseous hydrogen storage at 700 bar (USD)	4 000	2 000	900	1 500	2 000
MeH2 hydrogen solid storage (USD)			2 000	2 000	2 000
DME storage tank (USD)	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
Fuel cell stack (USD)	144 000	40 000	2 800	5 200	6 000
Electric engine (USD)	1 900	1 700	1 200	1 400	2 025
DME reformer (USD)	24 000	12 000	5 200	6 000	6 000
Ref. Conventional ICE vehicle (USD)	19 450	19 450	19 450	19 450	19 450
Ref. Conventional vehicle w/o engine (USD)	17 050	17 050	17 050	17 050	17 050
DME on-board reforming FCV (USD)	188 450	72 250	27 750	31 150	32 575
Hydrogen FCV (USD)	167 000	60 750	21 950	25 150	27 075
Hydrogen FCV drive system cost (USD/kW)	1 875	545	60	100	125


Hydrogen
Renewable AC electricity
100 kWh
Electricity
AC-DC conversion
(95%)
95 kWh
AC via grid
transmission
(90%)
90 kWh
Electrolysis
(75%)
71 kWh
Compression
(90%)
64 kWh
Liquefaction
(65%)
46 kWh
AC-DC conversion
and
battery charging
(85%)
77 kWh
Transport/transfer
80%
51 kWh
Transport/transfer
90%
42 kWh
Fuel cell
50%
26 kWh
Fuel cell
50%
21 kWh
Electric vehicle
with
regenerative braking
(90%)
69 kWh
Fuel cell vehicle
90%
23 kWh
Fuel cell vehicle
90%
19 kWh

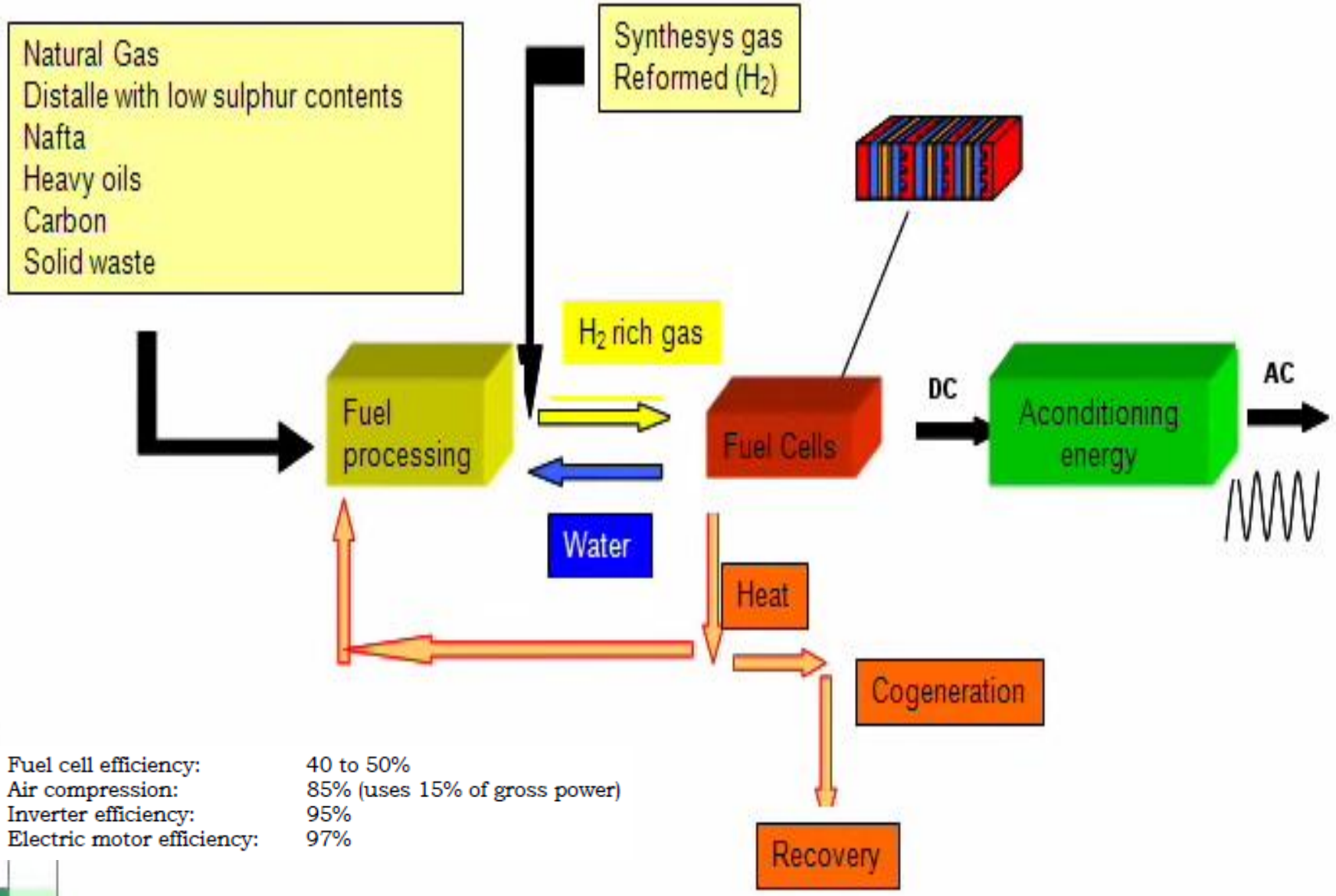
Bossel, 2006

Wind-Hydrogen System Concept



Esse mesmo modelo se aplica a Energia Solar

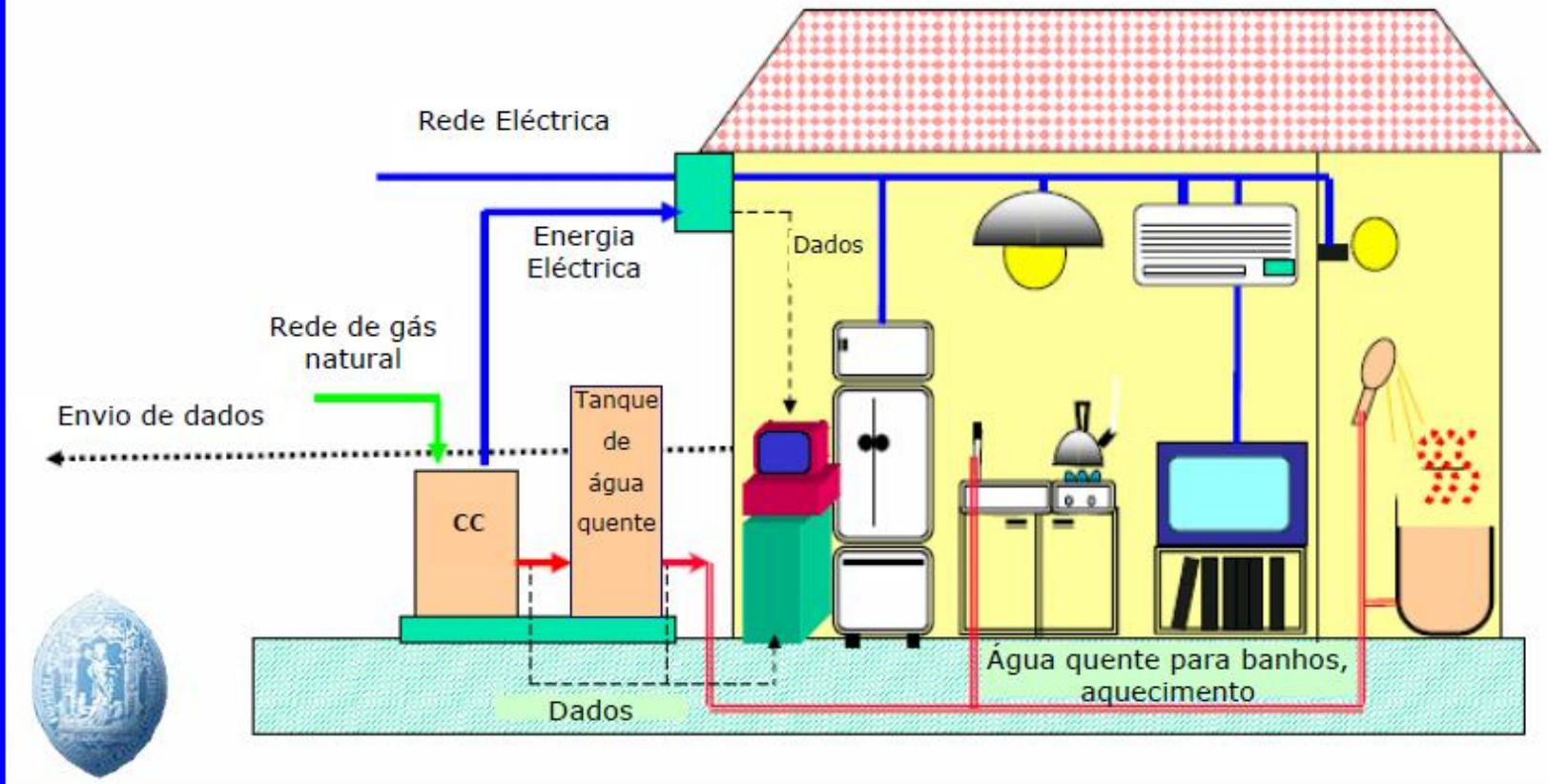
Wind-Hydrogen Forms a Green Energy Cycle and is Technically Feasible



Fuel cell efficiency:	40 to 50%
Air compression:	85% (uses 15% of gross power)
Inverter efficiency:	95%
Electric motor efficiency:	97%

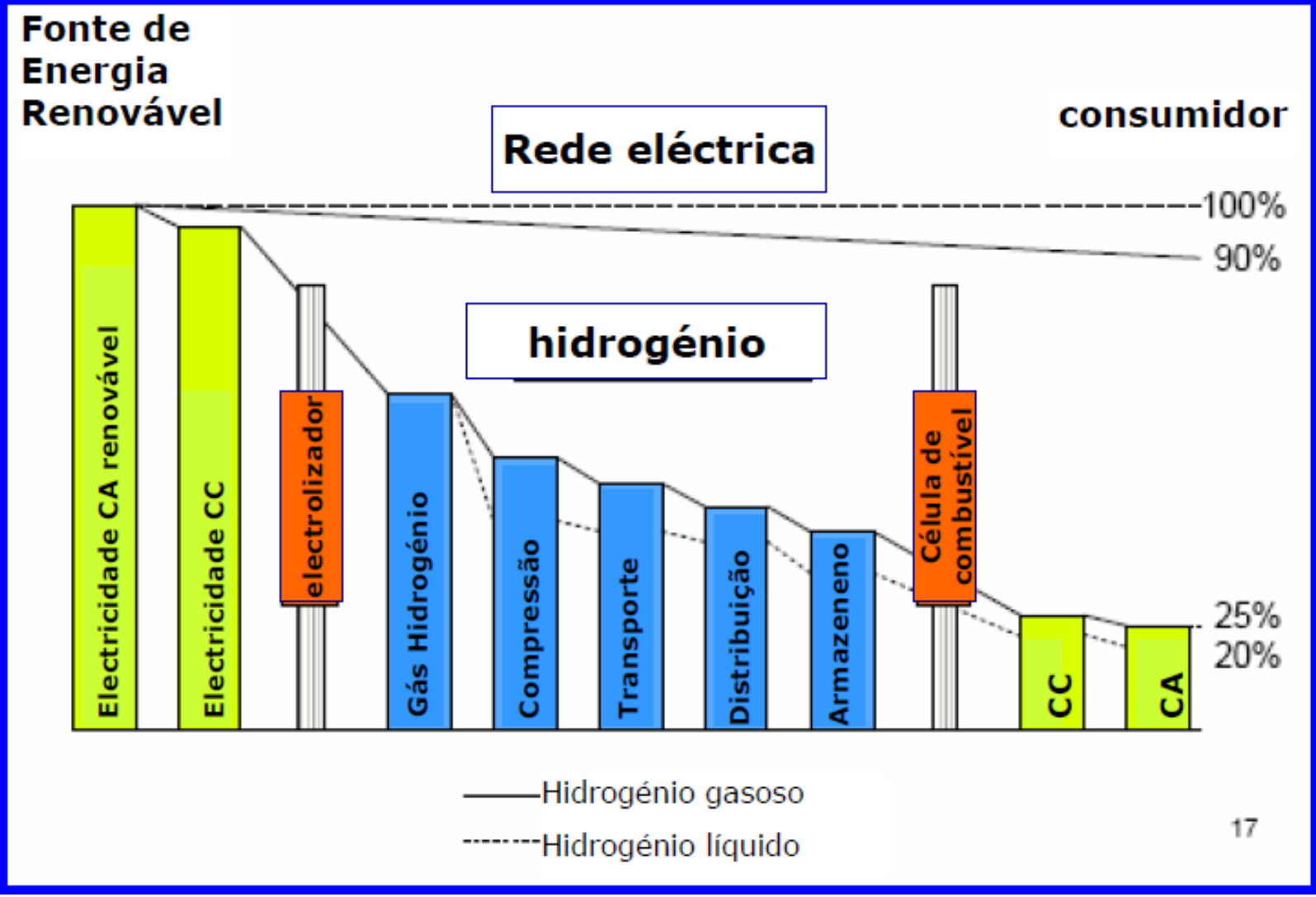
Exemplo

Célula de Combustível numa Casa (Japão)



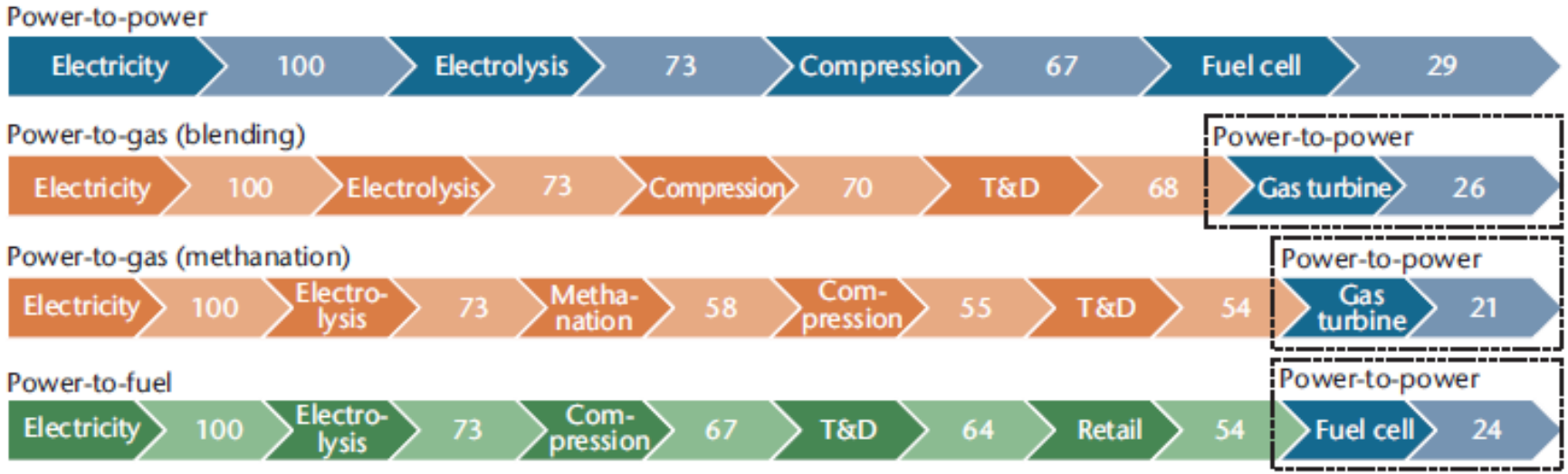
Almeida, 2003

Transporte de electricidade renovável pela rede e hidrogénio



Almeida, 2003

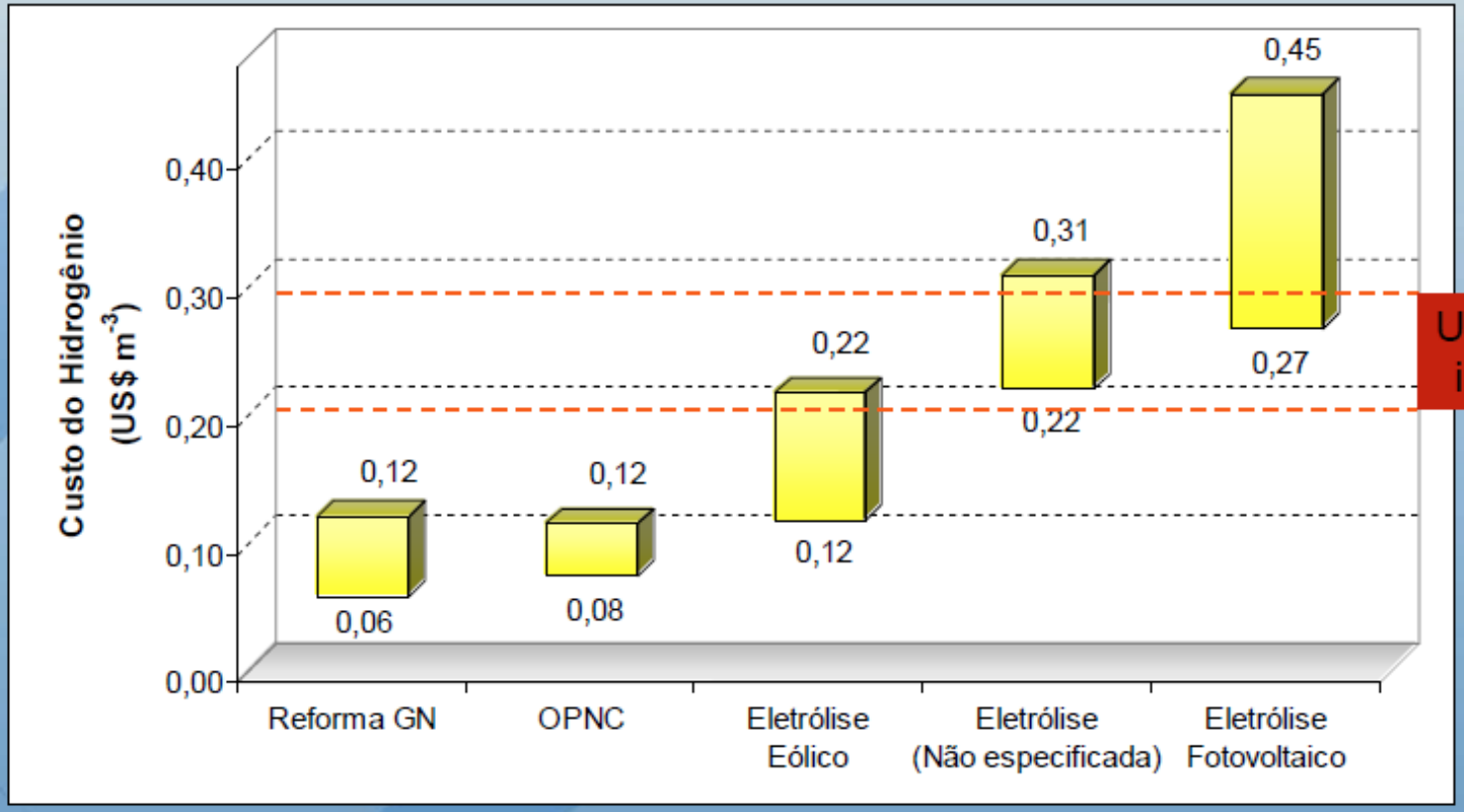
Figure 6: Current conversion efficiencies of various hydrogen-based VRE integration pathways



Note: The numbers denote useful energy; except for gas turbines, efficiencies are based on HHV; the conversion efficiency of gas turbines is based on LHV.

KEY POINT: Total round-trip efficiencies of hydrogen-based energy storage applications are low.

IEA, 2015



PADRÓ, C. E. G. & PUTSCHE, V., Survey of the economics of hydrogen technologies, National Renewable Energy Laboratory – NREL, Technical report. Sept. 1999. NREL/TP – 570-27079, pp. 53, 1999.

Preço em 08/11/2018:
Hidrogênio – 99,95% → R$13,97/m³ ou USD3,71/m³

Atualizando pelo Dolar (5,45):
Hidrogênio – 99,95% → R$13,97/m³ ou USD2,56/m³

Back off Envelop Calculation...

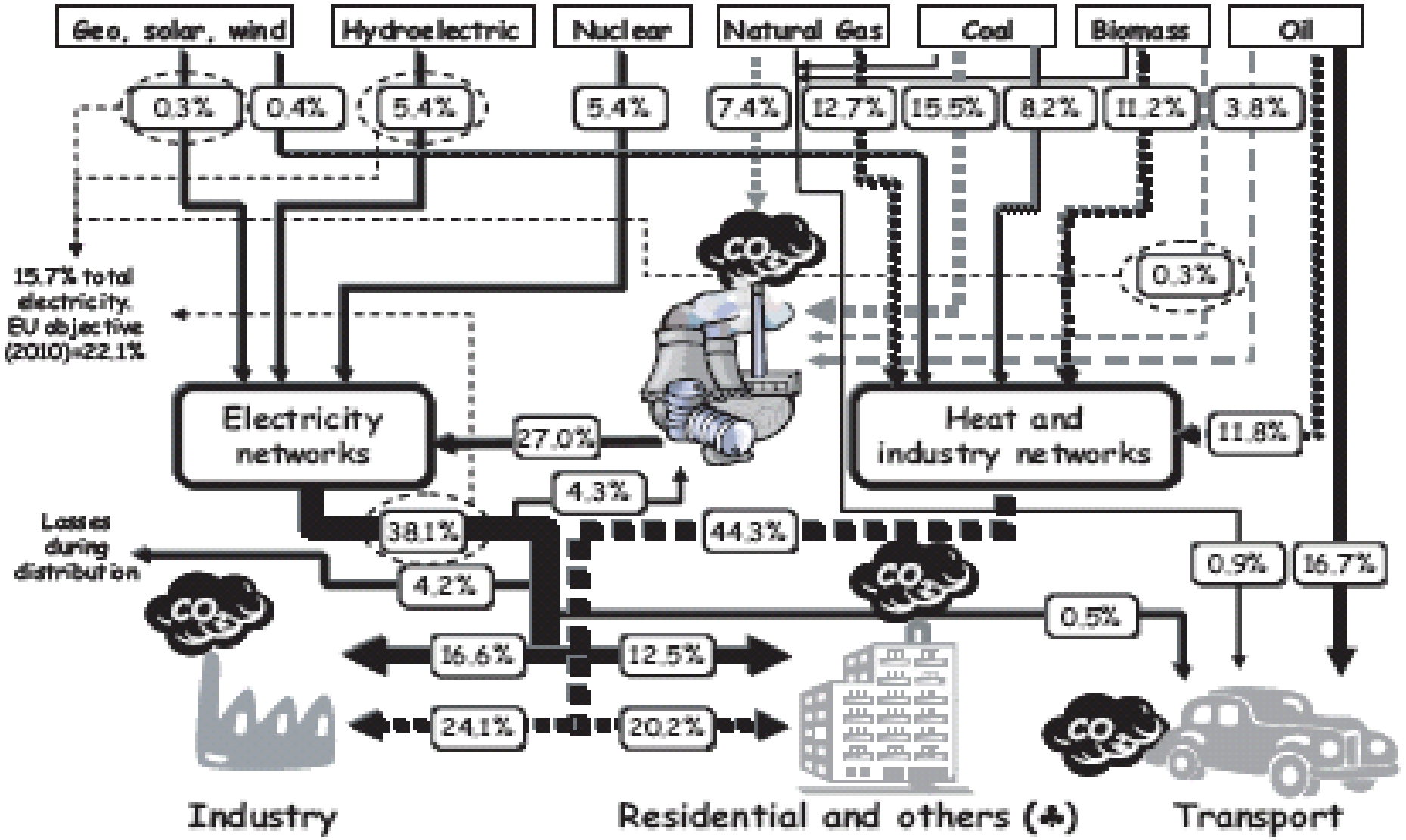
- Qual deve ser o custo de H2 para ser competitivo;

- Com valores atuais do H2,quanto é o valor da energia para combustíveis;

Back off Envelop Calculation...

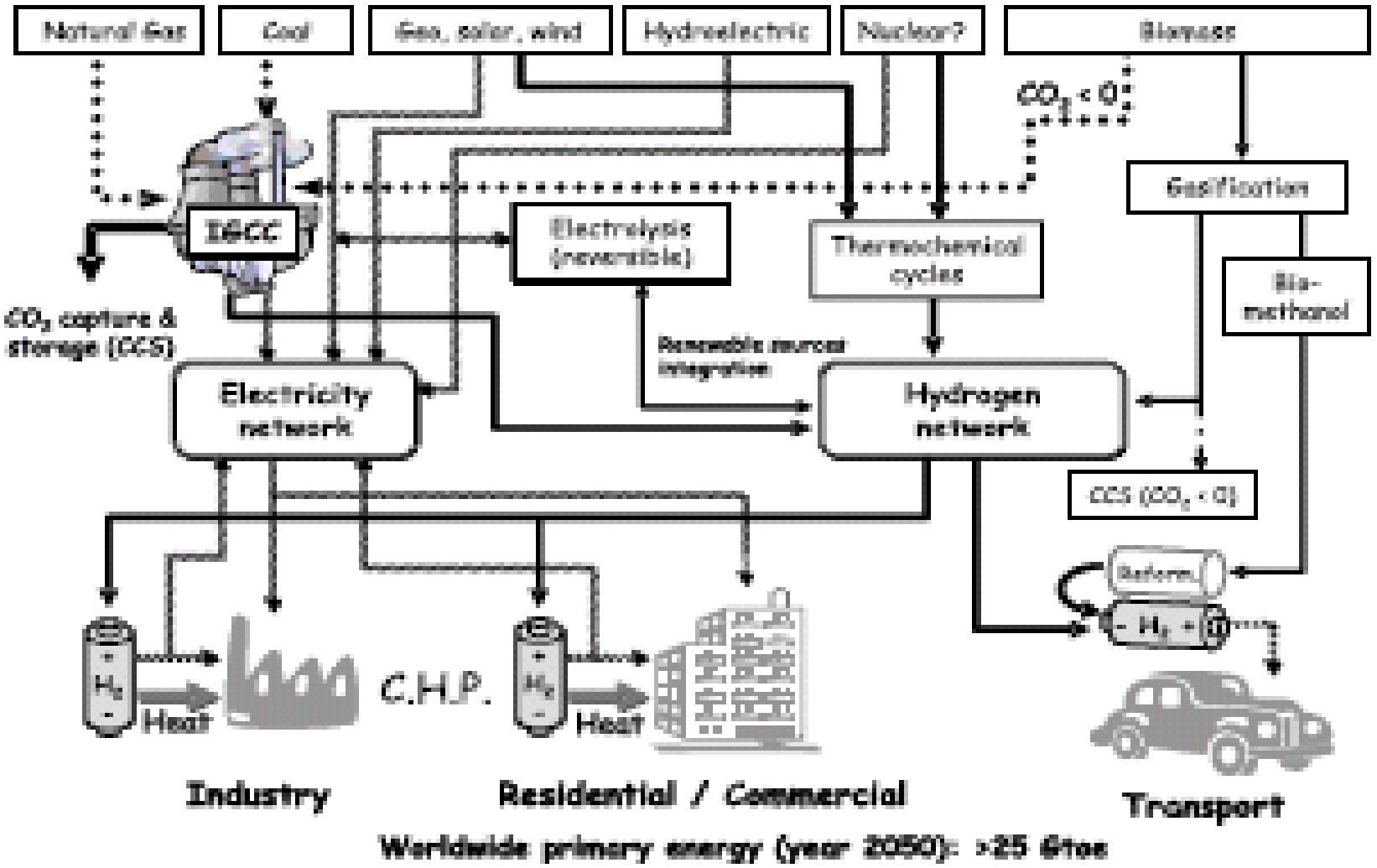
O Resultado é Dramático

E o Futuro?...



G. Marbán, T. Valdés-Solís / International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 1625 – 1637

E o Futuro!?...



G. Marbán, T. Valdés-Solís / International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007) 1625 – 1637

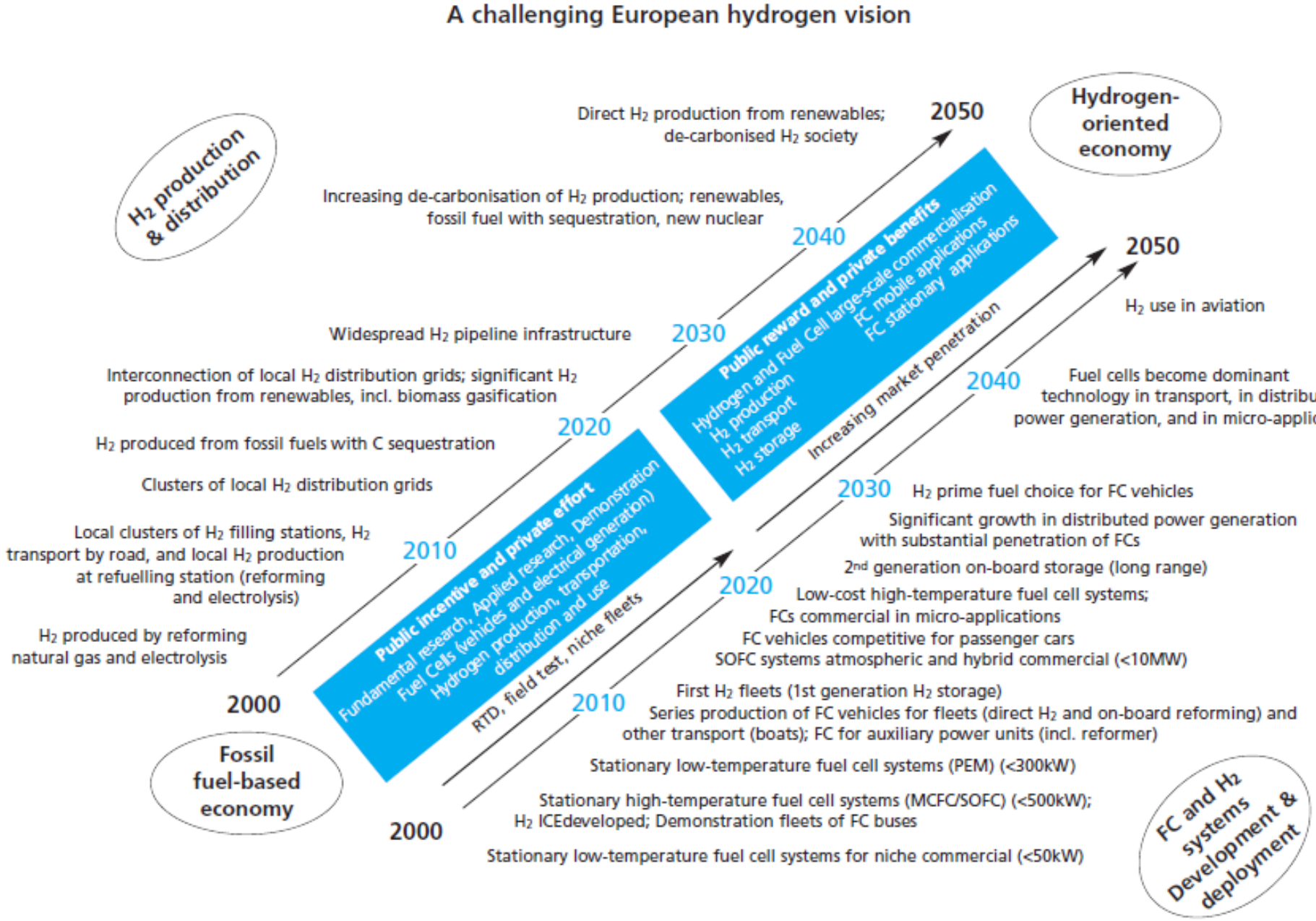


Figure 4: Skeleton proposal for European hydrogen and fuel cell roadmap

European Comission, 2003

A economia do hidrogénio

É uma perspectiva aliciante :

- é potencialmente um portador de energia abundante, limpo, seguro e flexível.

Questões Fundamentais . . .

-NÃO é uma fonte de energia, mas um portador de energia

- Não dispõe ainda de uma rede integrada

- Ainda não é competitivo em termos de custos, desempenho ou de fiabilidade face aos combústíveis fósseis

- As avaliações mais optimistas situam a economia do hidrogénio a décadas de distância

Almeida, 2003

extremely inefficient proposition for the distribution of electricity from renewable sources to useful electricity from fuel cells. Only about 25% of the power generated from wind, water, or sun is converted to practical use. If the original electricity had been directly supplied by wires, as much as 90% could have been put to service. This has two serious consequences to be considered in future energy strategies.

A) About four renewable power plants have to be erected to deliver the output of one plant to stationary or mobile consumers via hydrogen and fuel cells. Three of these plants generate energy to cover the parasitic losses of the hydrogen economy while only one of them is producing useful energy. Can we base our energy future on such wasteful schemes?

B) As energy losses will be charged to the customer, electricity from hydrogen fuel cells will be at least four times more expensive than electricity from the grid. Who wants to use fuel cells? Who wants to drive a hydrogen-fuel-cell car?

Fundamental laws of physics expose the weakness of a hydrogen economy. Hydrogen, the artificial energy carrier, can never compete with its own energy source, electricity, in a sustainable future.

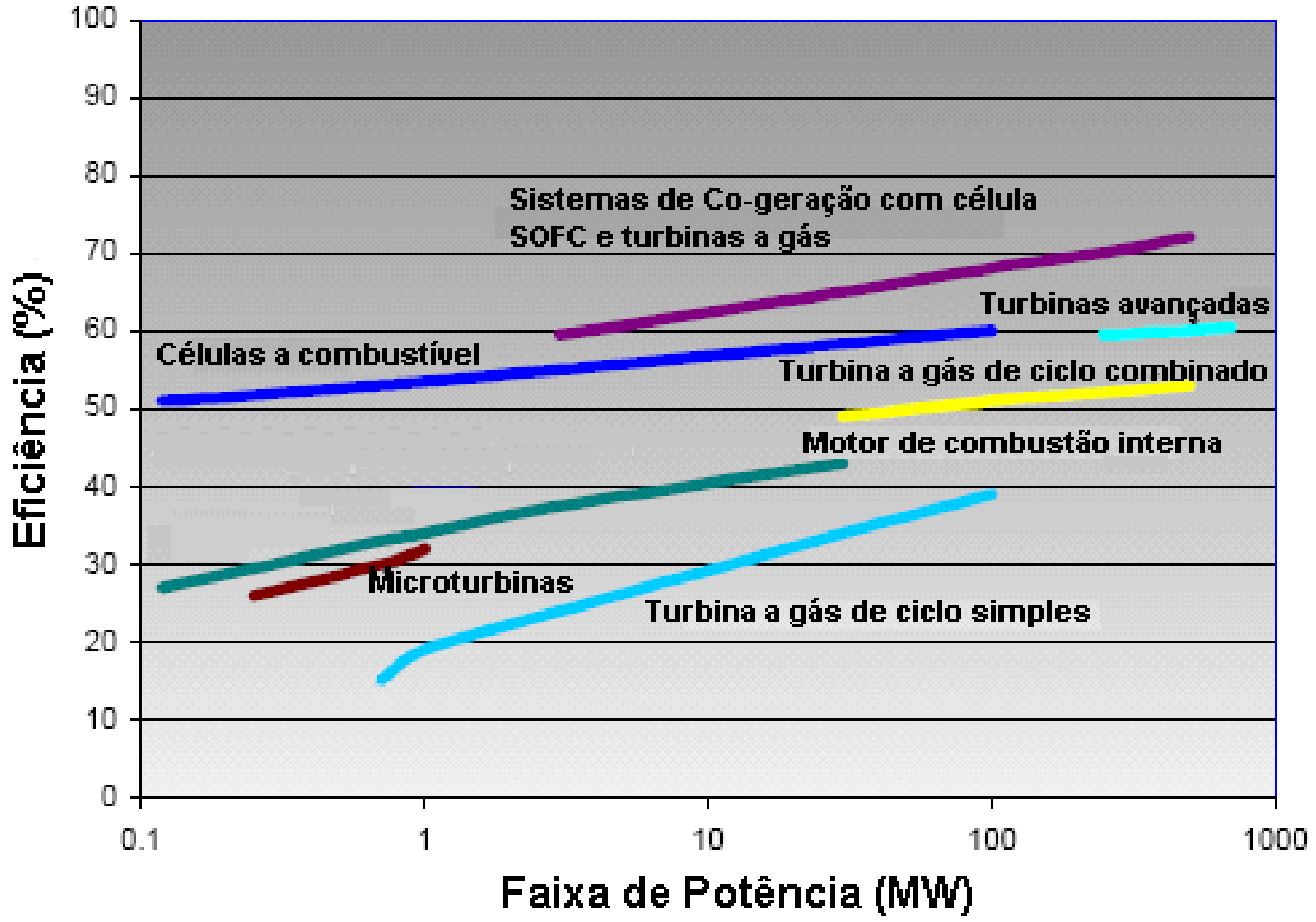
The discussion about a hydrogen economy is adding irritation to the energy debate. We need to focus our attention on sustainable energy solutions. It seems that the establishment of an efficient electron economy should become the common goal. There are many topics to be addressed, like electricity storage and automatic electricity transfer to vehicles, yet electric cars equipped with Li–Ion-batteries already have a driving range of 250 km [32]. In 2010, Mitsubishi will commercialize an electric car with 260 hp on four wheels and a driving range of 500 km (300 mi). It seems that by focusing attention on hydrogen we are missing the chance to meet the challenges of a sustainable energy future.

The title question "Does a hydrogen economy make sense?" must be answered with a definite "Never." However, niche applications for the use of hydrogen energy are abundant and should be addressed. ■

Considerações- Tópico 2

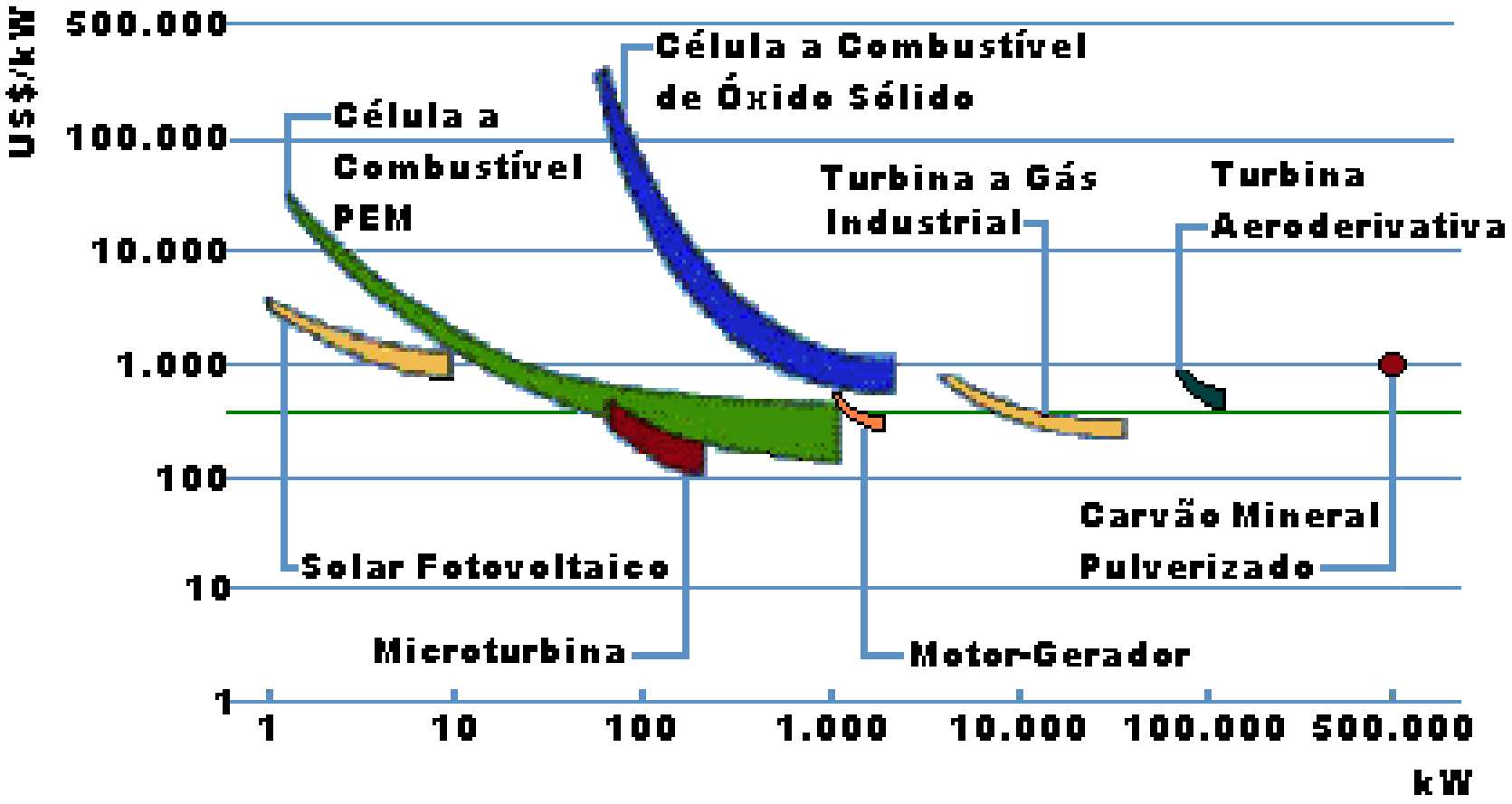
Célula a Combustível

Tecnologias de geração: Eficiência x Potência

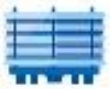


Fonte: Fuel Cell Handbook – sixth edition

Tecnologias de geração: Custo x Potência

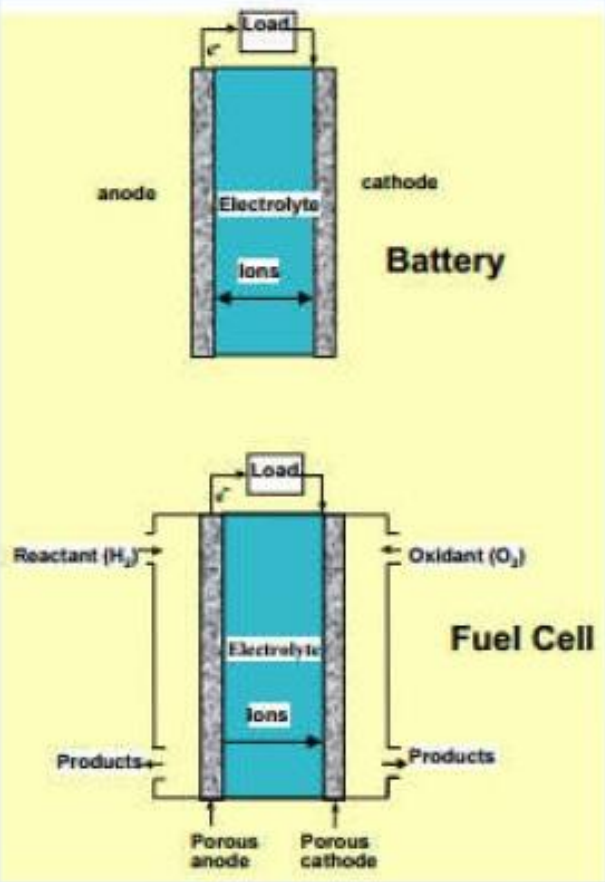


Fonte: EPRI 2000-2010

		Modular	Ultra-Low Emissions	Dispatchable	Electrical Efficiency > 60%	Net Water Production
Wind		✓	✓			
Diesel Engine		✓		✓		
Natural Gas Combined Cycle			✓	✓	✓	
Solar PV		✓	✓			
Gas Engine		✓		✓		
Fuel Cell Simple Cycle		✓	✓	✓		✓
Fuel Cell-Combined Cycle		✓	✓	✓	✓	✓

Source: GE

célula a combustível *vs* Baterias



- Similaridades: ambas se baseiam em s reações de redox, convertem energia química diretamente em energia elétrica, possuem eletrólito condutor de íons.

- Células a combustível podem fornecer densidades de energia acima de 6000 Whr/kg dependendo do combustível, já as baterias 150 Whr/kg.

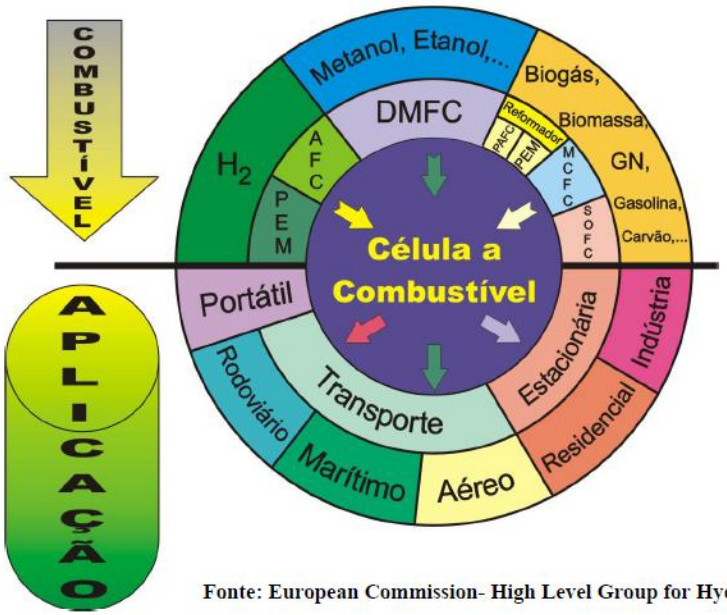
- Desvantagem das Células a combustível: custo e reservatórios para armazenar o combustível

Definição de CaC...

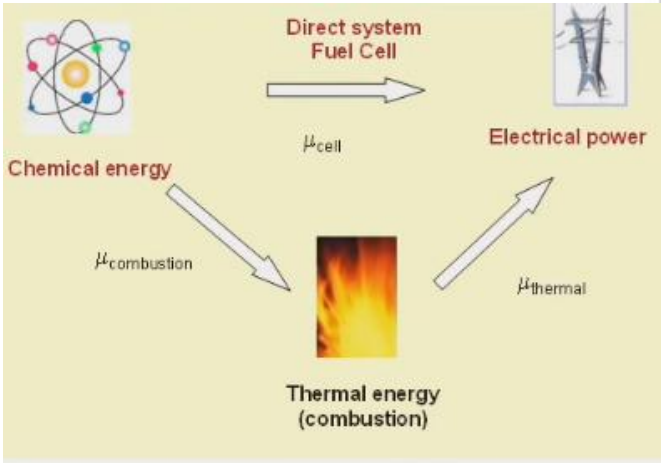
Célula a Combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem **energia química** em **eletricidade**.

A ABNT (*ABNT NBR IEC 62282-2:2010*) normatiza a sua nomenclatura:

Células A Combustível. Mas...



Fonte: European Commission- High Level Group for Hydrogen and Fuel Cells

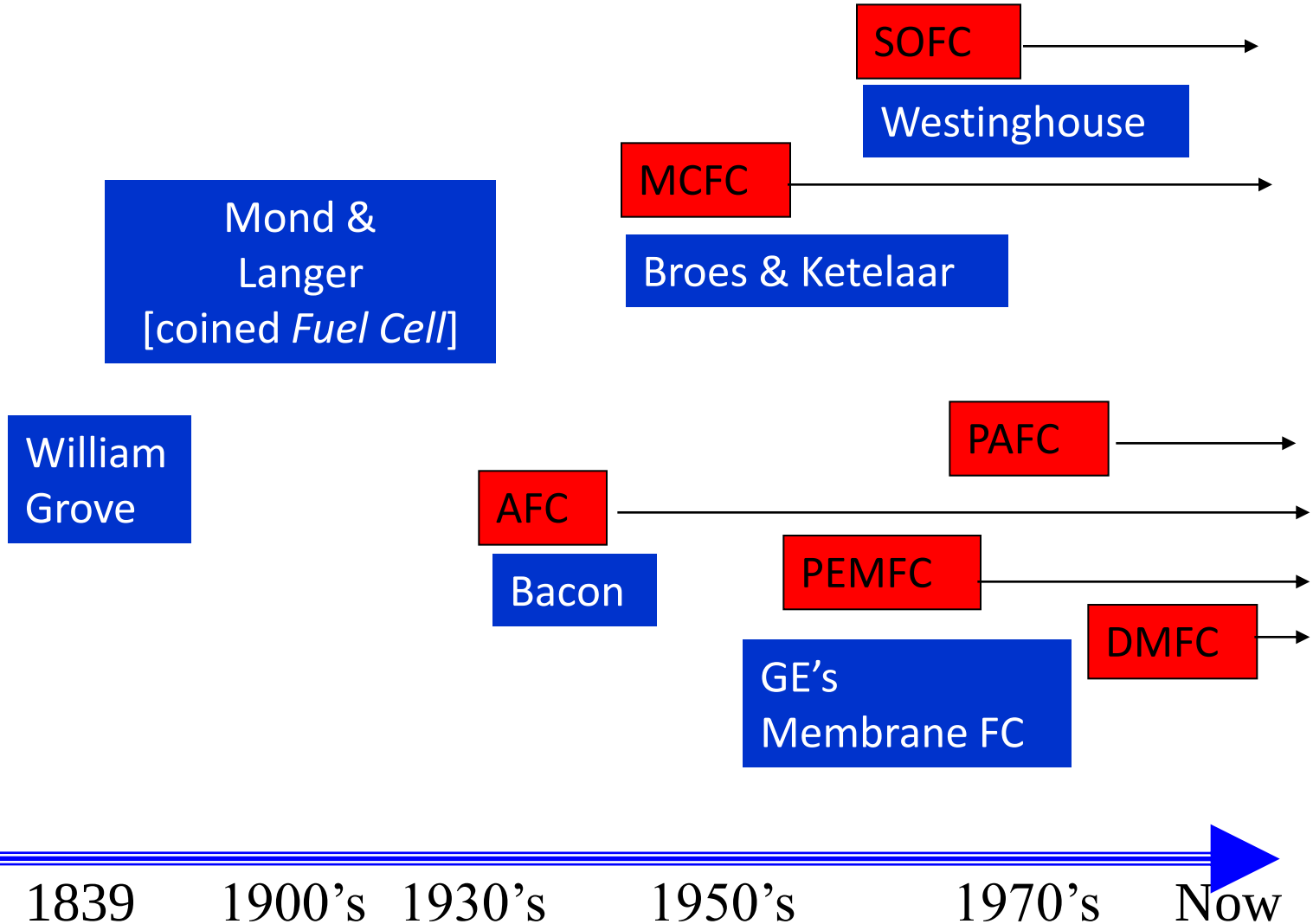


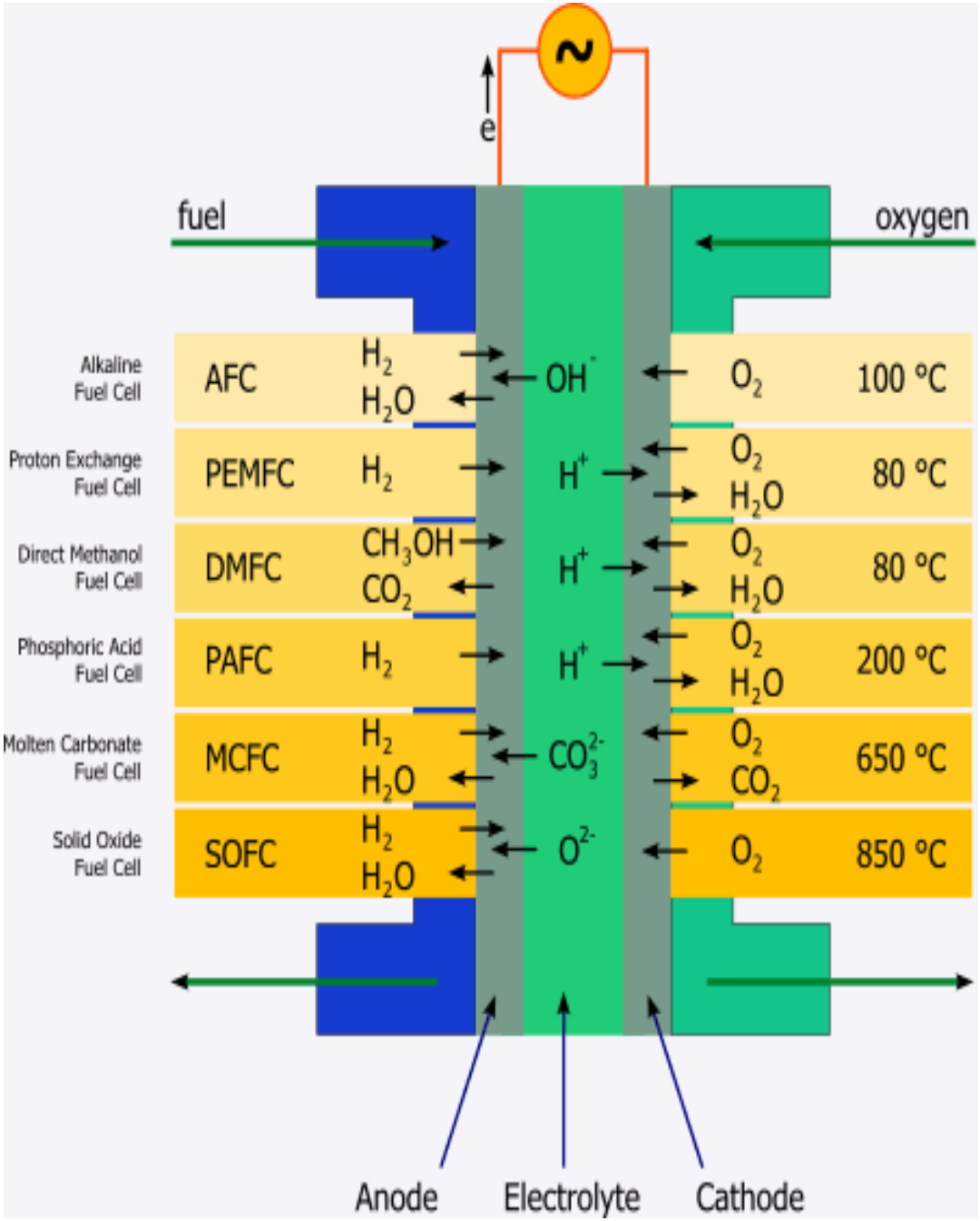
Diferentes formas de se classificar:

- Combustível e oxidante empregados (H2, álcool, CH4)
- Pré tratamento: interno, externo
- **Tipo do Eletrólito**: compósito ou estado físico
- Temperatura de operação: baixa, alta
- Geometria: plana, cilindrica

Serra e Furtado, 2006

Fuel cell history, new or old?



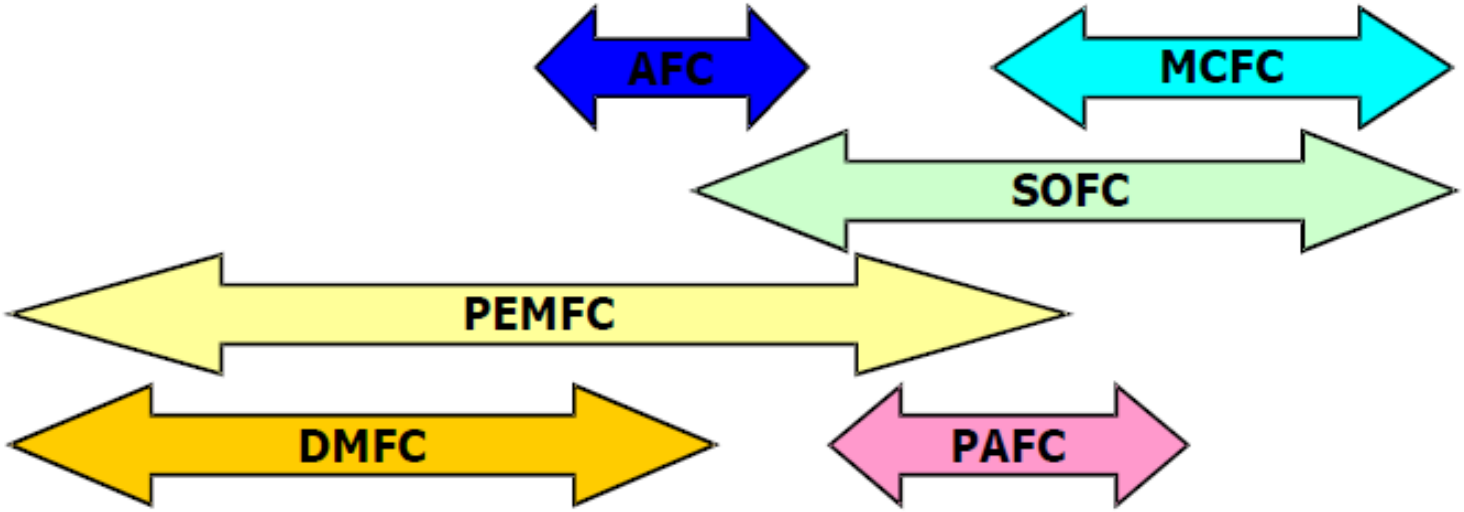


Fonte: Fuel Cell Handbook – sixth edition

Tipos de Célula x Potência x Aplicação

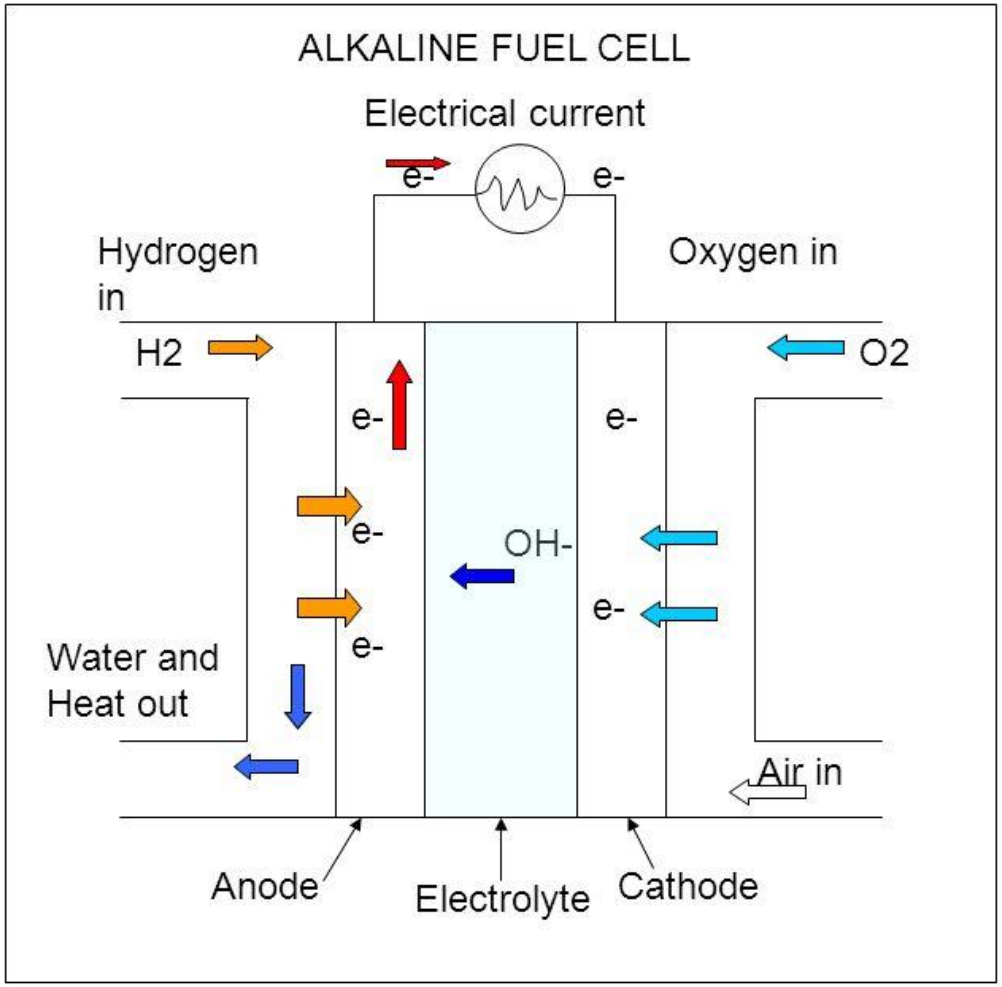
Aplicações Típicas	Equipamentos Eletrônicos Portáteis			Geração Residencial		Veicular	Geração Distribuída	
Potência (Watts)	1	10	100	1K	10K	100K	1M	10M
Principais Vantagens	Densidade de energia mais elevada que as baterias			Alta eficiência, Emissões nulas			Alta eficiência, Menos poluição,	

Faixa de Aplicação dos Diferentes Tipos de Células a Combustível



Serra e Furtado, 2006

AFC



Reação Anódica e Reação Catódica

$H_2 + OH = H_2O + 2e$

$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e = 2OH^-$

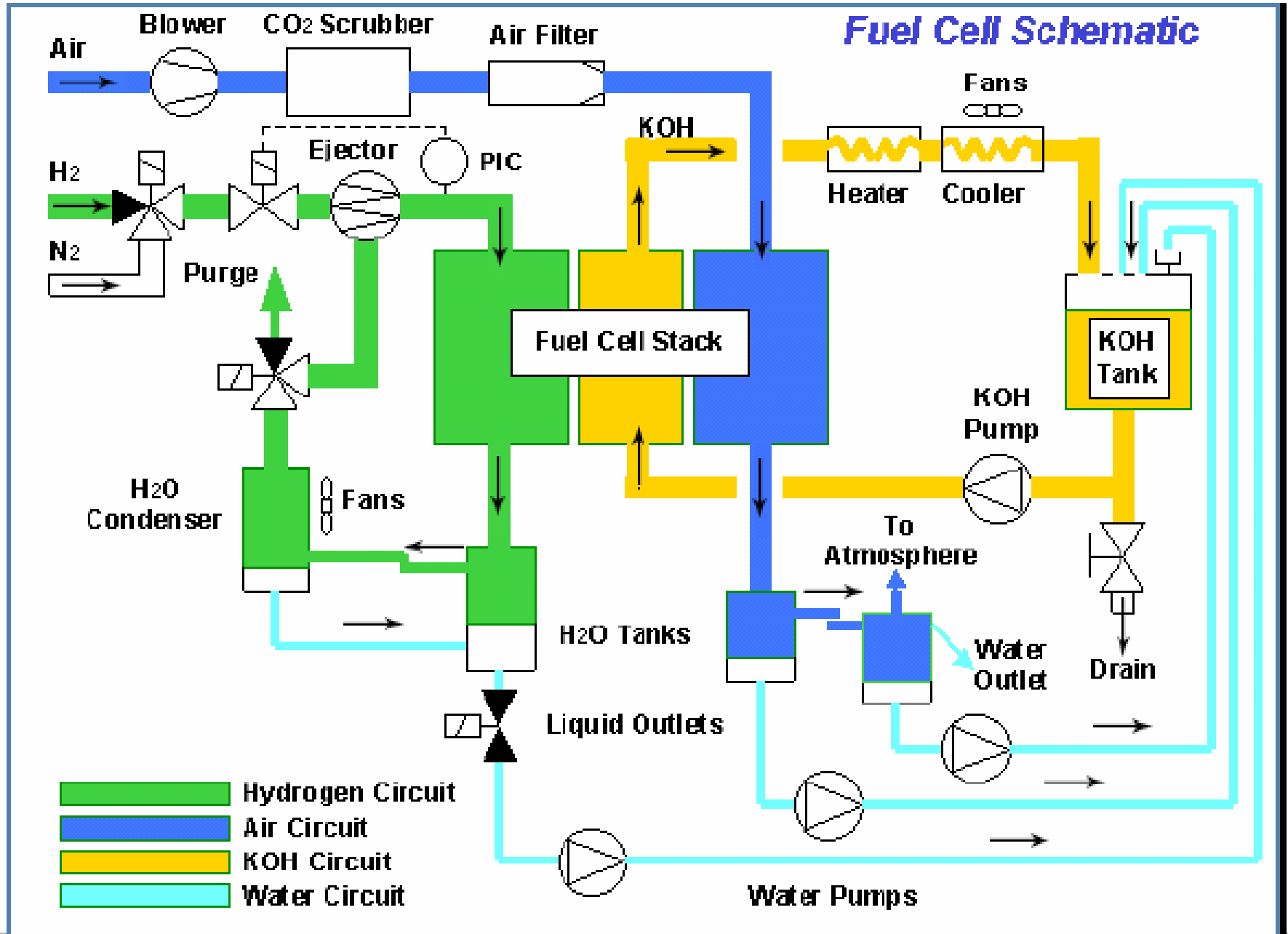
Fuel cell types and chemical systems

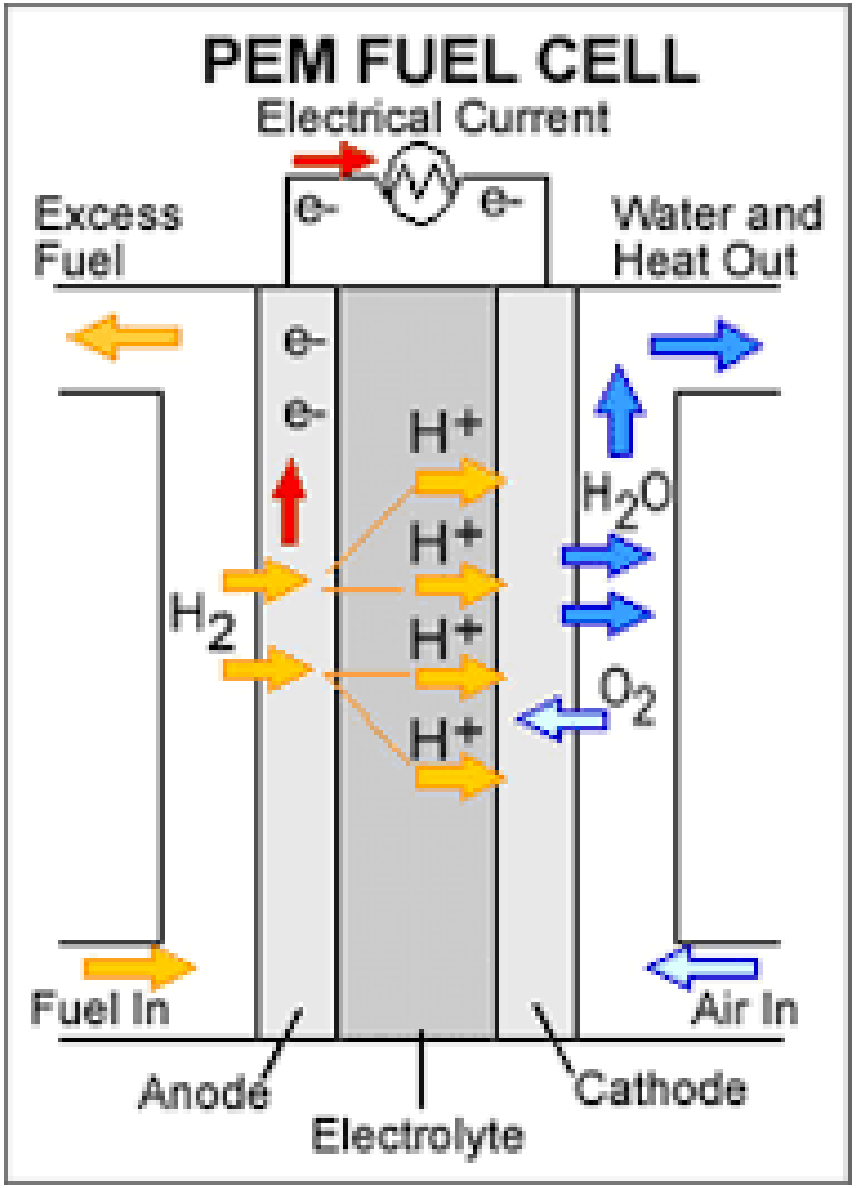
Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temp. °C	Fuel	Applications	Advantages	Power Density
Alkaline (AFC)	Aqueous solution KOH	65 – 250	Pure H_2	Military Space	Fast electrode reactions, can use several catalysts	High

UTC – Power stack Shuttle
Maximum power: 12 kW (AFC)
Other: The spacecraft has three stacks, fed with hydrogen and oxygen stored in liquid state. Water can be drinkable.

- Confidence energy and safe in spatial missions
- Relevant advantages respect to other alternative energies
- Gemini and Apollo projects
- Cryogenic hydrogen and oxygen
- Up to 80000 hours of work in 100 missions

UTC, 12 kW stack


Fuel Cell Schematic
Air
Blower
CO2 Scrubber
Air Filter
Fans
KOH
Ejector
PIC
H2
Heater
Cooler
N2
Purge
Fuel Cell Stack
KOH Tank
KOH Pump
H2O Condenser
Fans
To Atmosphere
H2O Tanks
Water Outlet
Drain
Liquid Outlets
Hydrogen Circuit
Air Circuit
KOH Circuit
Water Circuit
Water Pumps



PEMFC

Reação Anódica
e
Reação Catódica

$H_2 = 2H^+ + 2e$

$½\ O_2 + H_2O + 2e = 2OH^-$

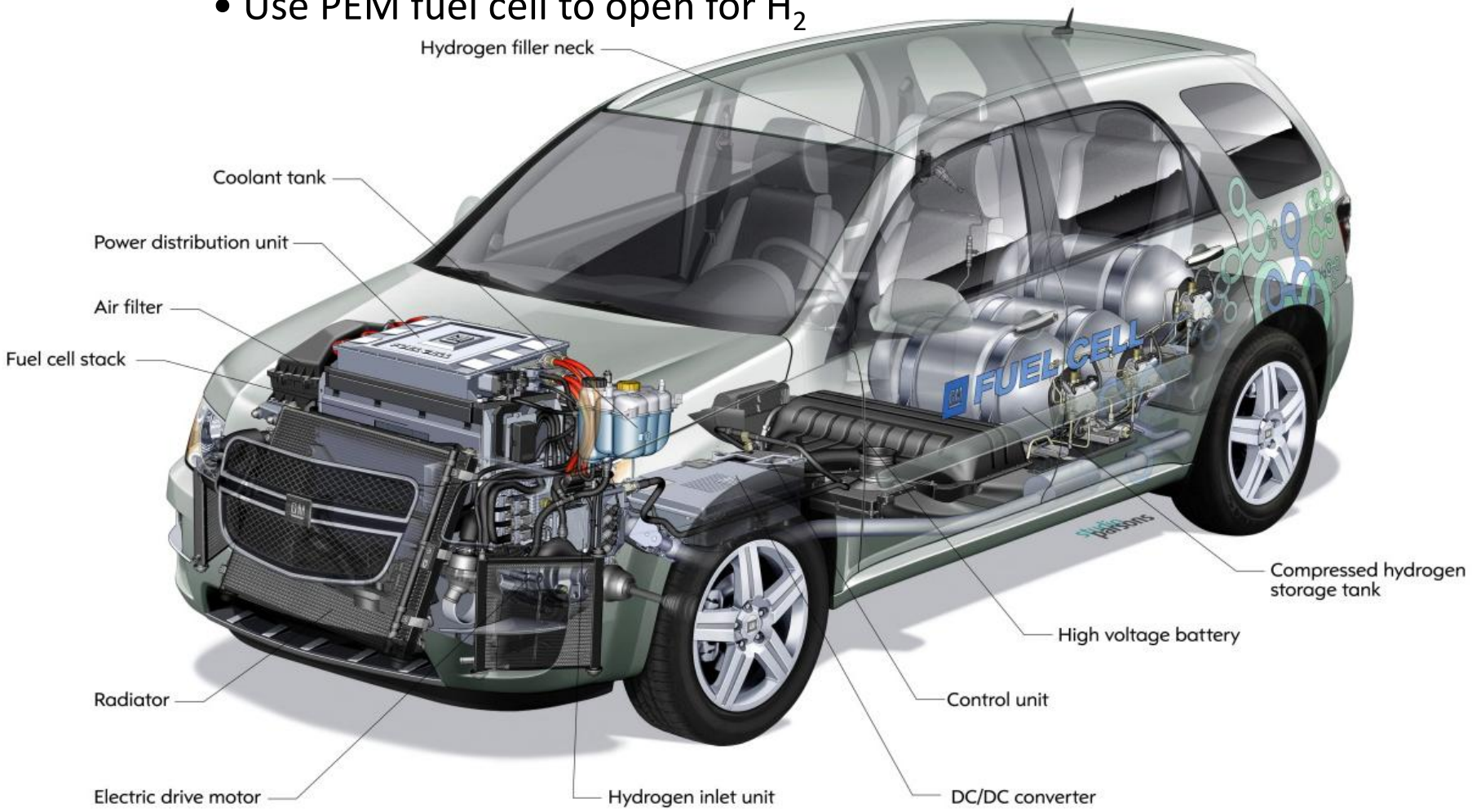
Fuel cell types and chemical systems

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temp. °C	Fuel	Applications	Advantages	Power Density
Polymer Electrolyte Membrane (PEM)	Solid organic polymer	50 – 100	H_2	Transportation Power backup systems	Low temperature, high power density, quick start-up	Highest

100 kW (134 hp) Honda FCX Clarity

PEM Fuel cell for transport sector

- Reduce dependence of fossil fuels
- Use PEM fuel cell to open for H_2



Fuel cell vehicles – 2015

Usar os dados para um exercício de viabilidade

Hyundai ix35

Nissan X-Trail FCV SUV

Toyota FCV concept

Typical technical specifications for fuel cell vehicles to be available in 2015

Vehicle types	
C/D	Family saloon/estate
E	Executive
J	SUV

Commercial introduction	
Date	2015

Powertrain	
Power source	Hydrogen Fuel Cell
Transmission	Electric Motor
Peak power	100kW (135bhp)
Continuous power	75kW (100bhp)
Torque	300Nm (220 lbft)

Fuel	
Pressurised hydrogen gas	
Tank pressure	70MPa (700bar)
Capacity	5kg
Consumption (NEDC)	1kg/100km (62miles/kg)*
Range (NEDC)	500km (320miles)

Performance	
Top Speed	160km/h (100mph)
Acceleration 0-100km/h (0-62mph)	12s

Emissions at tailpipe	
Carbon Dioxide	Zero (0gCO_2/km)
NOx (Oxides of Nitrogen)	Zero
Sulphur Dioxide	Zero
Particulates	Zero

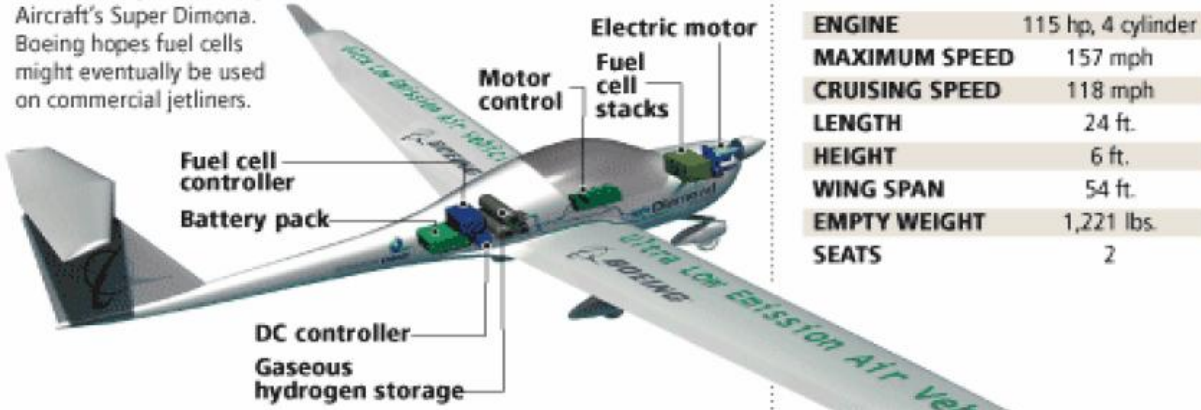
UK H2 Mobility report (2013)

Aplicação em Aviões

-Redução drástica de emissões e de ruído

BOEING'S LOW-EMISSION ELECTRIC PLANE

Boeing plans to test its first fuel-cell powered electric airplane by late 2004 or early 2005. The plane will be a modified version of Diamond Aircraft's Super Dimona. Boeing hopes fuel cells might eventually be used on commercial jetliners.



A fuel cell, batteries and electric motor will replace the standard piston engine on the Super Dimona. The modified plane will be flown by one pilot, with the cockpit space for the co-pilot taken up by the fuel cell.

Source: Boeing, Diamond Aircraft Industry

Plane specifications
For the HK36 Super Dimona

ENGINE	115 hp, 4 cylinder
MAXIMUM SPEED	157 mph
CRUISING SPEED	118 mph
LENGTH	24 ft.
HEIGHT	6 ft.
WING SPAN	54 ft.
EMPTY WEIGHT	1,221 lbs.
SEATS	2

E-Plane

Almeida, 2003

2009

Avião é capaz de decolar e voar durante cinco horas com energia produzida por hidrogênio e oxigênio

Moto a FC

Top Speed: 50 mph (80 kmh)

Range: 100 miles (160 km)

Hydrogen Storage tank capacity: 1 kg

Cost: $6,000 - 8000

Manufacturer: Intelligent Energy, London, UK

ENY: Emission Neutral Vehicle

Intelligent Energy is currently developing devices called reformers that extract hydrogen from biodiesel fuels (typically made from vegetable oils or animal fats) and ethanol (generally made from grain or corn). The units would sell for around U.S. $1,500 and could produce enough hydrogen to fill up the ENV for about 25 cents per tank.

National Geographic News, August 2, 2005

Serra e Furtado, 2006

Desenvolvimento de placas separadoras metálicas revestidas

Serra e Furtado, 2006

Aumentar o tempo de operação
Redução de peso
Melhorar o processo de recarga
Exigências:

- baixa temperatura de operação
- disponibilidade de combustível
- Partida rápida

CÉLULAS DIDÁTICAS (mW)

CÉLULAS PARA ELETRÔNICOS (W)

CÉLULAS PORTÁTEIS (kW)

Cantão, 2007

Applications

Mercado amplo
Projeto sob medida para as necessidades
Redução da exigência de combustível em missões
Redução de pessoal, equipamento e veículos de suporte.

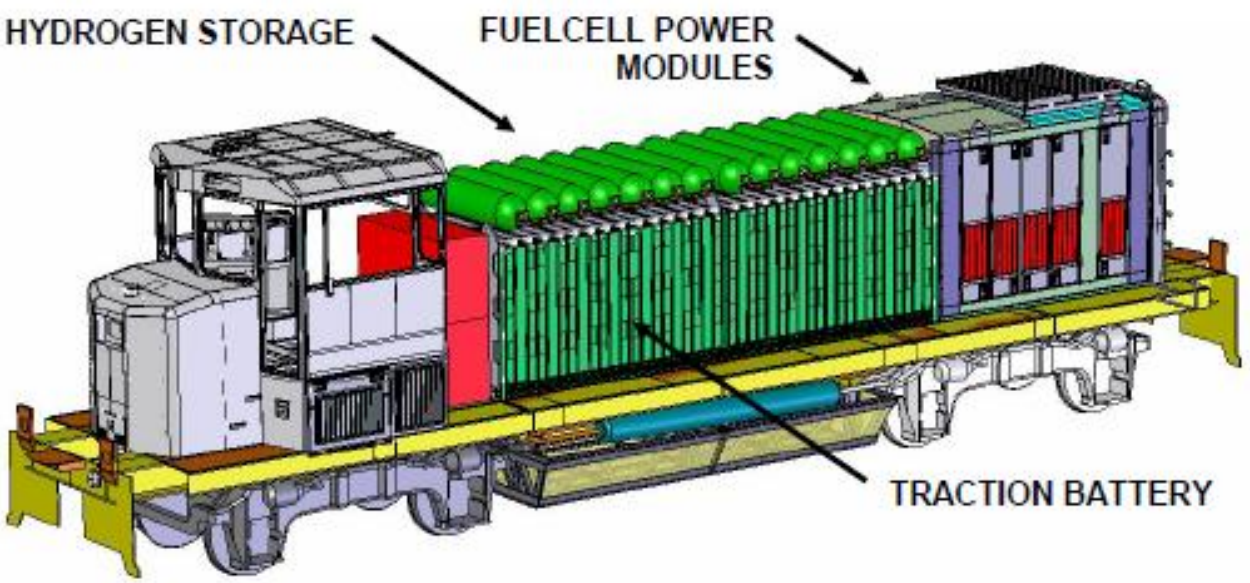
MILITARY APPLICATIONS

Maximum power stack: 1200 kW
Weight: 120 t
Other: 250 kg tank of H_2 (technology of metallic hydrides)

SIEMENS / HDW – 221A
Maximum speed: 145 km/h
Maximum power of stack: 300 kW (PEMFC)
Maximum power of engine: 50 kW
Maximum par: 239 Nm
Autonomy: 15 days

Locomotivas

The locomotive's fuelcell prime mover provides 250 kW of continuous net power for traction or power-to-grid, and the auxiliary traction battery allows transient power in excess of 1 MW.



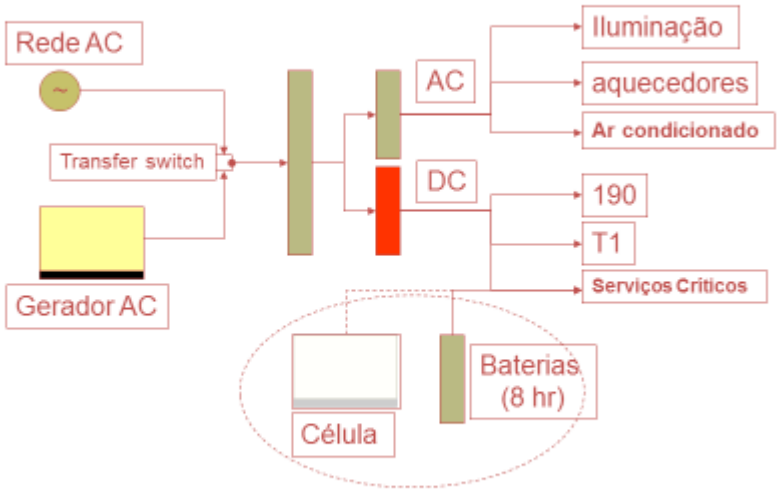
Miller, 2006

Figure 4-5 Submarine Fuel Cell Powerplant

Key Points & Notes

This 80 kW powerplant was built by Ballard Power Systems for German submarine manufacturer Howaldtswerke-Deutsche Werft AD and operates using pure hydrogen and oxygen.

Instalação típica em telecomunicações



A célula combustível adiciona capacidade ao backup existente ou o substitui.

2

Quanto tempo de operação ?

- Depende da quantidade de combustível H_2

5 kW = 100A @ 48V = 10 horas para 6 tanques de H_2

2.5 kW = 50A @ 48V = 20 horas para 6 tanques de H_2

Quanto menor a corrente maior o tempo de trabalho.

Possui boa regulação

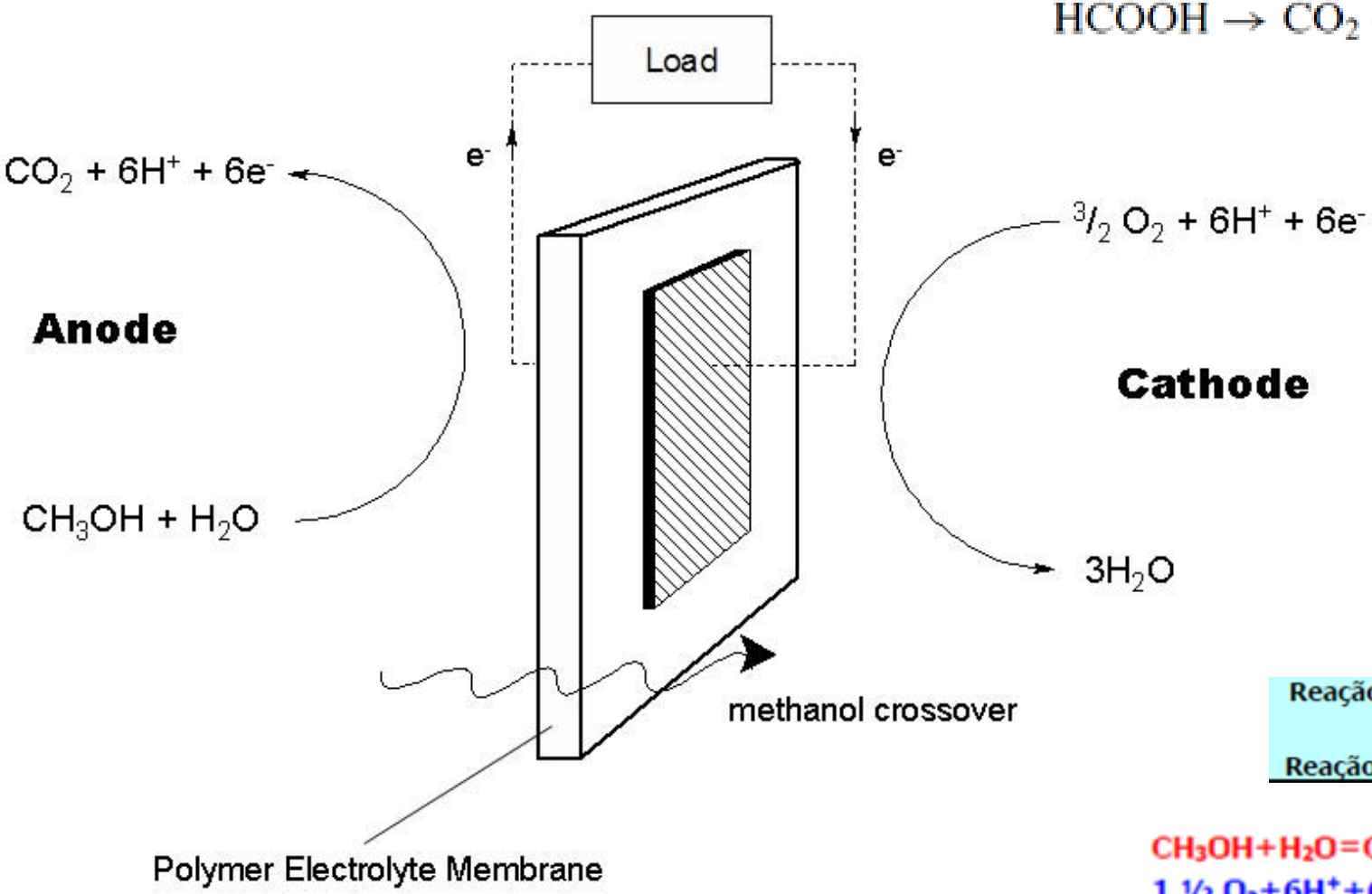
Melhor que 1%

DMFC

$$CH_3OH \rightarrow CH_2O + 2H^+ + 2e^-$$

$$CH_2O + H_2O \rightarrow HCOOH + 2H^+ + 2e^-$$

$$HCOOH \rightarrow CO_2 + 2H^+ + 2e^-$$



Reação Anódica
e
Reação Catódica

$CH_3OH + H_2O = CO_2 + H^+ + 6e$

$1\ ½\ O_2 + 6H^+ + 6e = 3H_2O$

$$C_2H_5OH \text{ (ethanol)} \rightarrow CH_3CHO \text{ (ethanal)} + 2H^+ + 2e^-$$

Electrons flow round external circuit

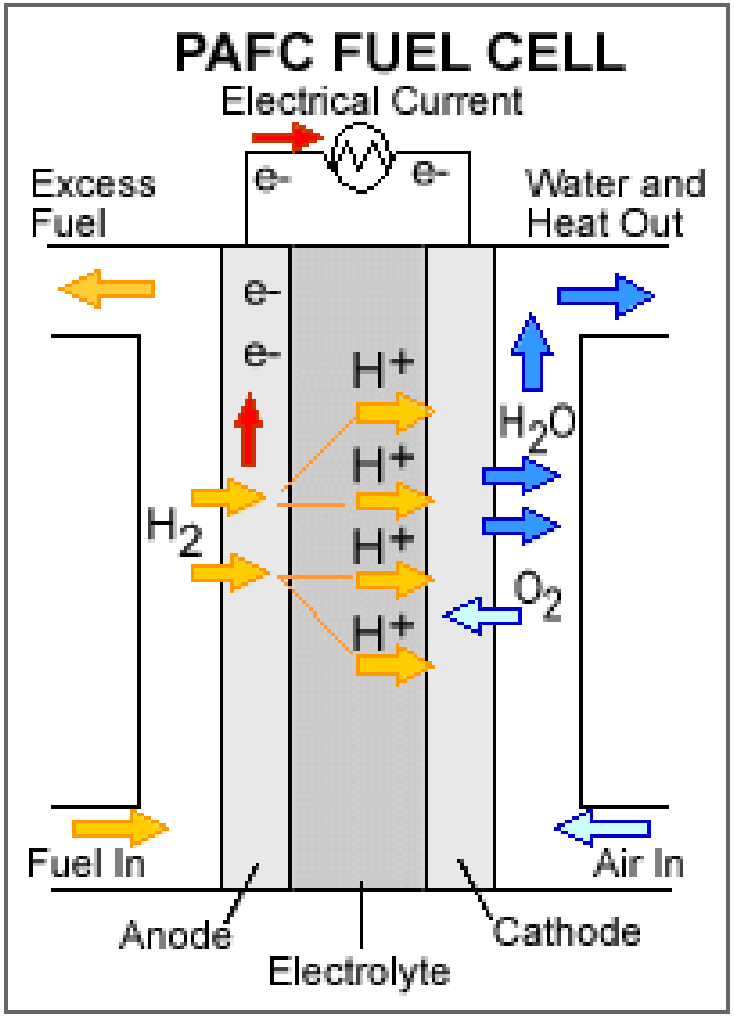
and

$$\tfrac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$$

Figure 2.5 Fuel cell–based breathalyser as used by police forces in the USA. (Reproduced by kind permission of Lion Laboratories Ltd.)

Fuel Cell Explained

PAFC



Reação Anódica
e
Reação Catódica

$H_2 = 2H^+ + 2e$

$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e = 2OH^-$

Fuel cell types and chemical systems

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temp. °C	Fuel	Applications	Advantages	Power Density
Phosphoric Acid (PAFC)	Phosphoric acid in a SiC matrix	150 – 200	H_2	Stationary power production	Improved CO tolerance, long lifetime	Low

200 kW UTC PureCell 200, installed power stations, PAFC

Aplicações estacionárias das CaCs: Aplicação no Brasil

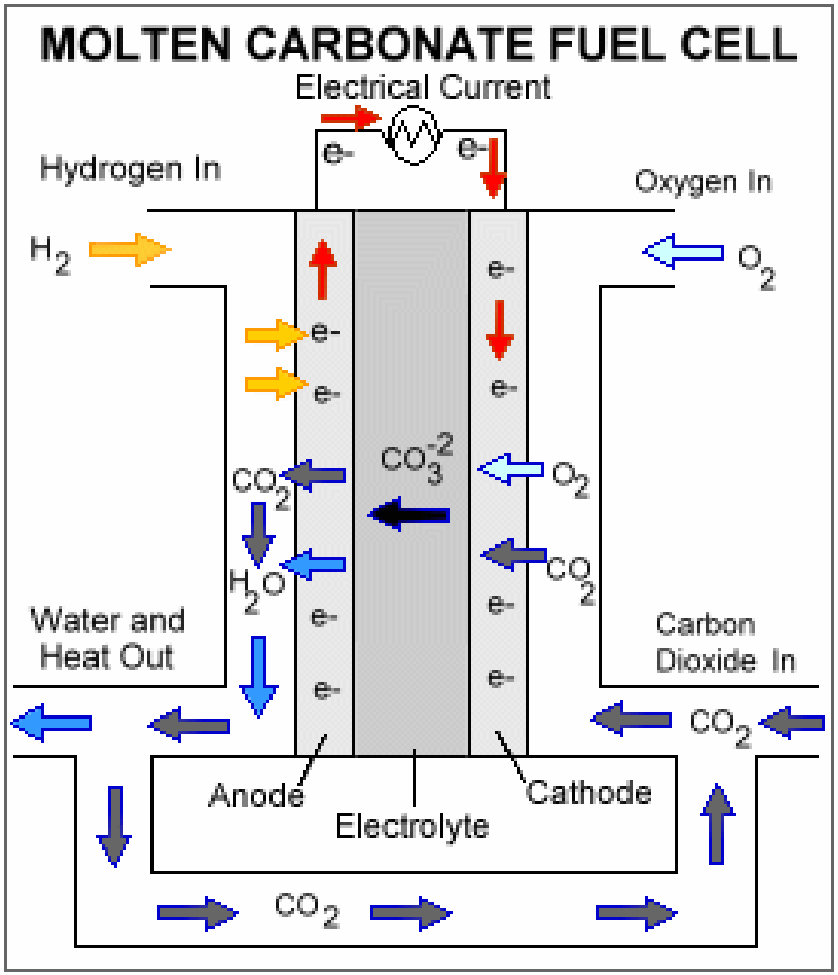
PAFC, Modelo PC25 - UTC Fuel Cells

Características principais:

- Potência: 200 kW_e
- Instalação: US$ 4,750 kW^{-1}
- Ideal: US$ 1,710 kW^{-1}
- Custos: US$ 70 por MWh (GN, manutenção)
- Consumo: 247 m^3 por MWh
- Total: 73% (eletricidade e calor)

Fonte: CENEH baseado em comunicação com o LACTEC

MCFC



Reação Anódica e Reação Catódica

$H_2 + CO_3^{-} = H_2O + CO_2 + 2e$

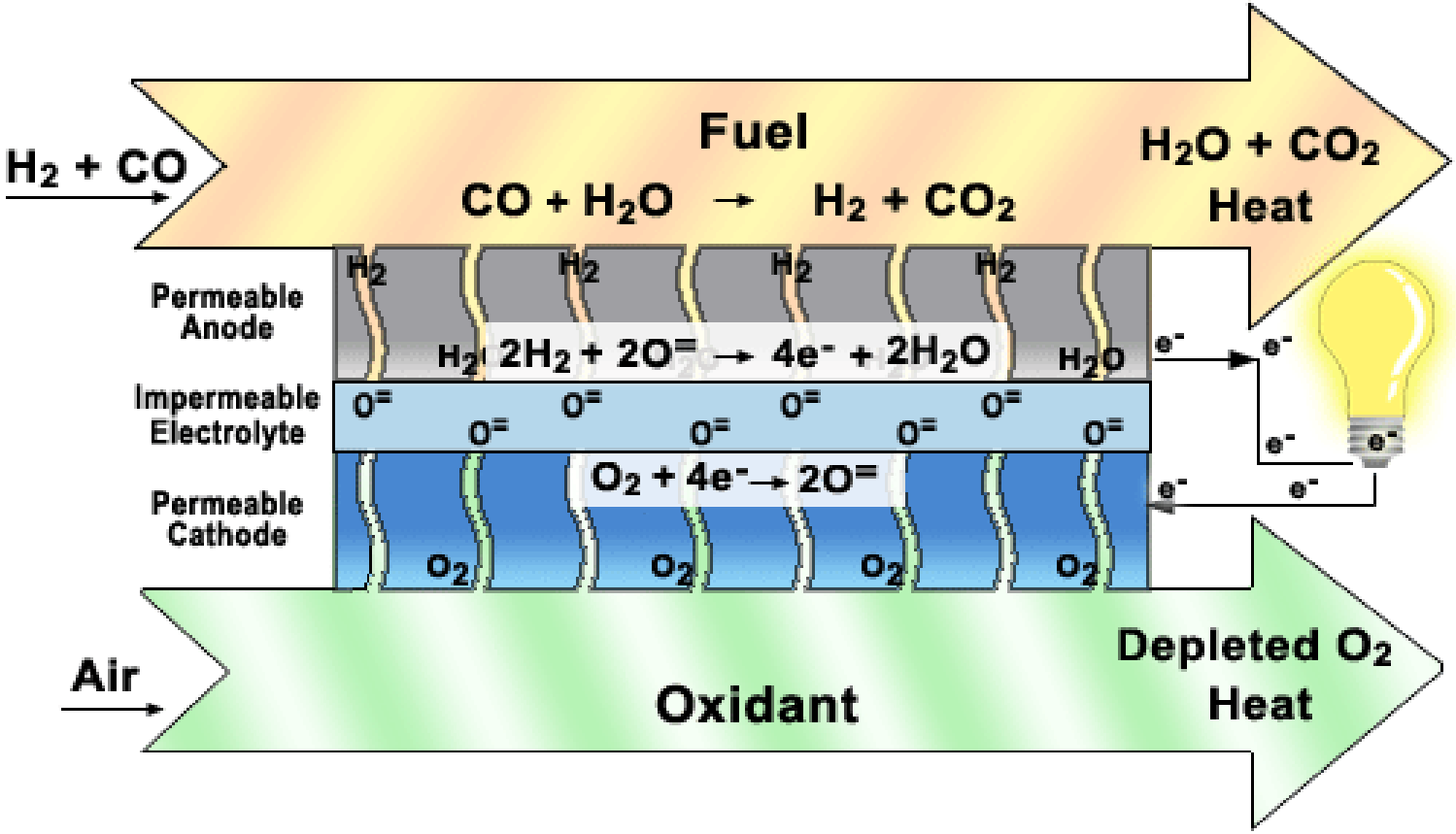
$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e = CO_3^{-2}$

Fuel cell types and chemical systems

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temp. °C	Fuel	Applications	Advantages	Power Density
Molten Carbonate (MCFC)	Liquid solution of, Li, Na, K carbonates	600 – 700	Reforming of fossil fuel H_2	Large power stations, continuous power	CO tolerant, many fuels, high temperature waste heat, high CHP eff.	Low

430 kW hybrid, MCFC

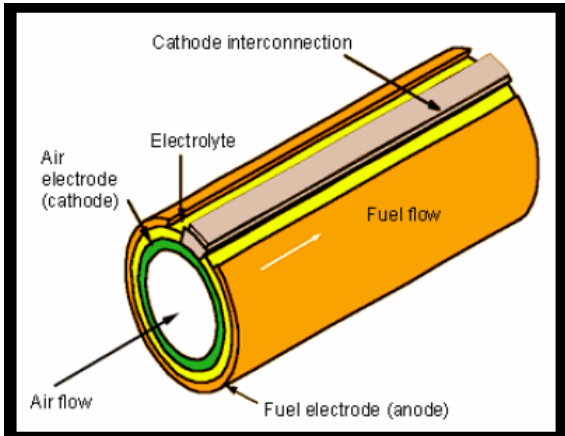
Solid Oxide Fuel Cell

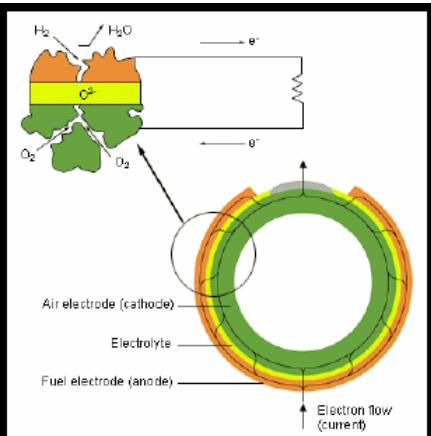


Reação Anódica
e
Reação Catódica

$H_2 + 2O^{-2} = 2H_2O + 4e$

$O_2 + 4e = 2O^{-2}$

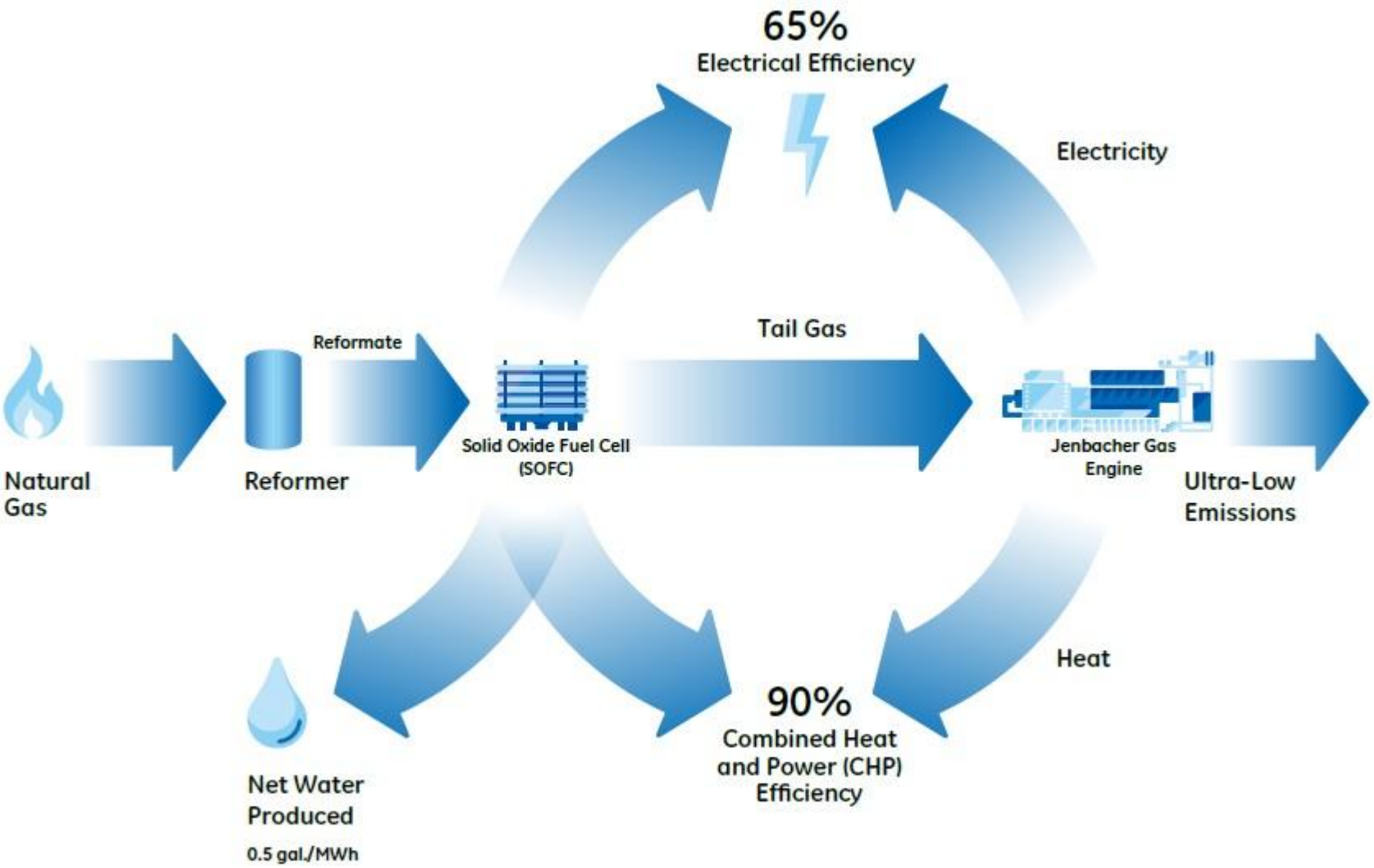




Fuel cell types and chemical systems

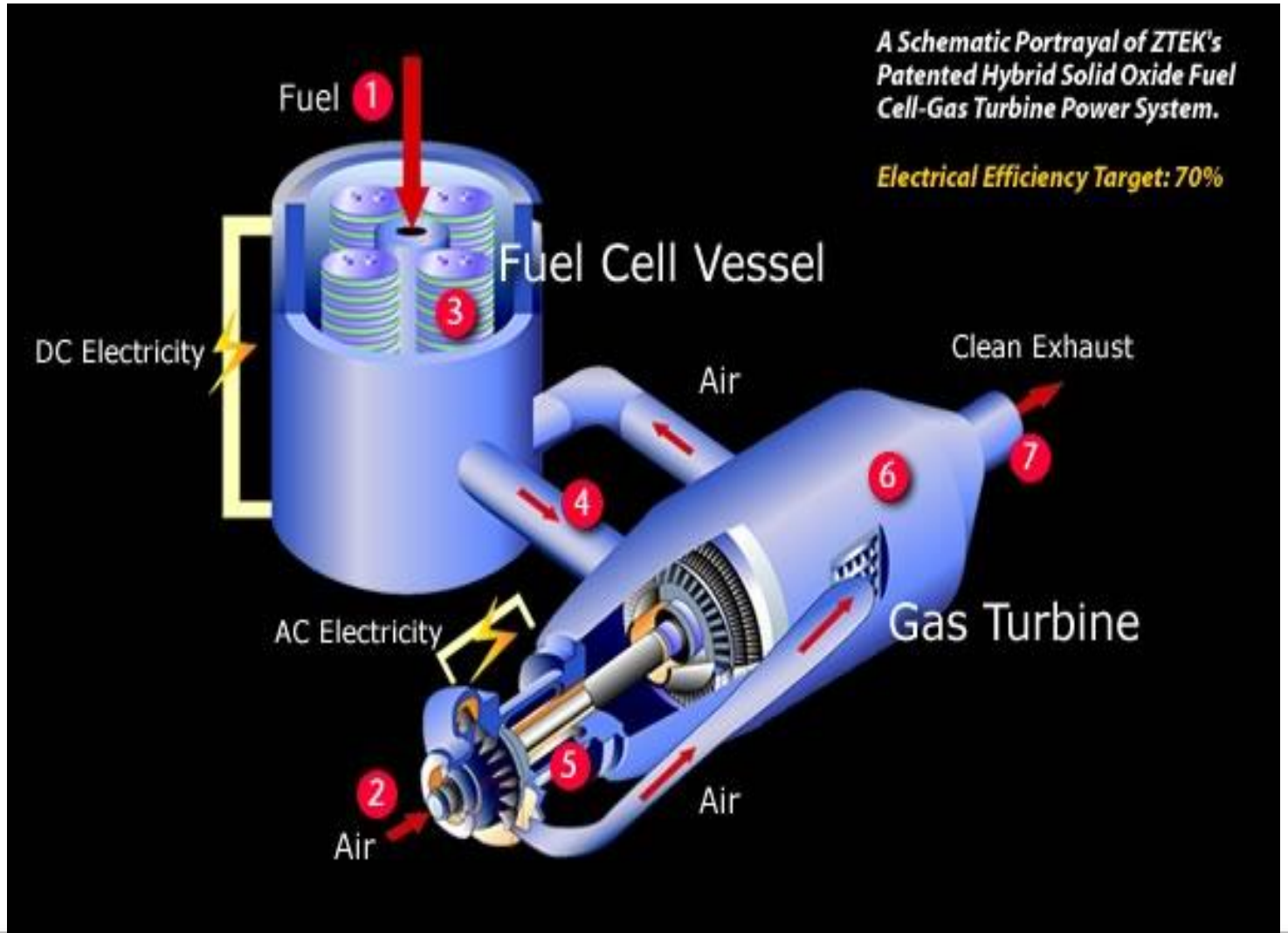
Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temp. °C	Fuel	Applications	Advantages	Power Density
Solid Oxide (SOFC)	Yttria stabilized zirconia	600 – 1000	Reforming of fossil fuel H_2	Large power stations, continuous power	CO tolerant, many fuels, high temperature waste heat, high CHP eff.	Medium

220 kW hybrid, SOFC

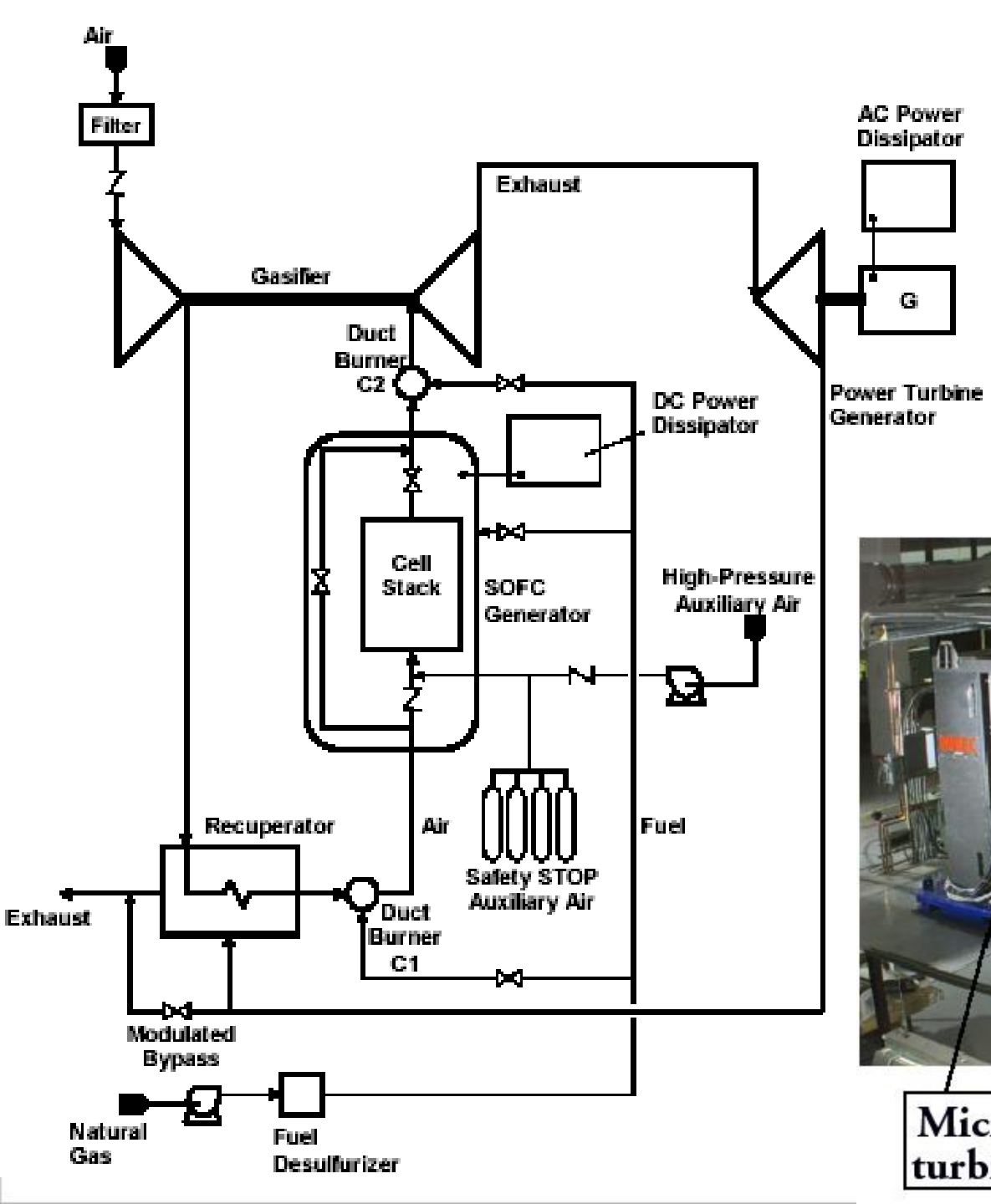

65%
Electrical Efficiency
Electricity
Tail Gas
Reformate
Natural Gas
Reformer
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)
Jenbacher Gas Engine
Ultra-Low Emissions
Heat
90%
Combined Heat and Power (CHP) Efficiency
Net Water Produced
0.5 gal./MWh

Source: GE

SISTEMAS HÍBRIDOS



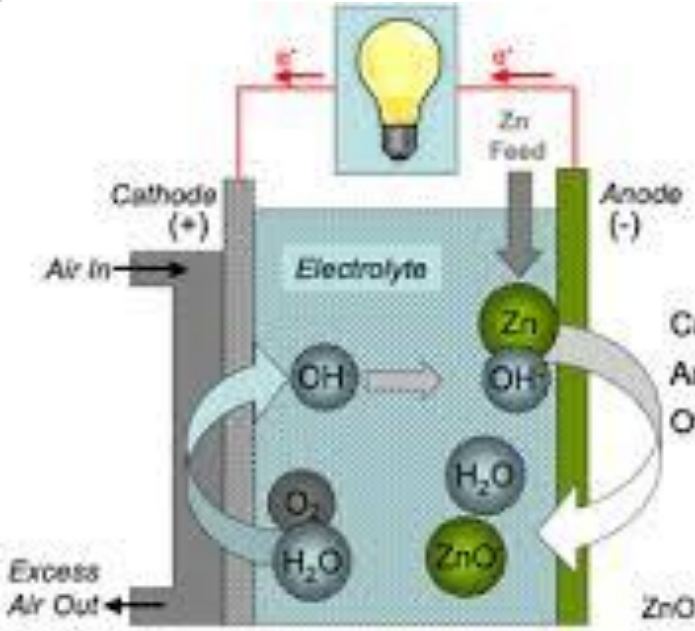
Ciclo do sistema de 220 kWe SOFC/GT (176/47 com 54%)



Micro turbina

SOFC

FC Zn/Air



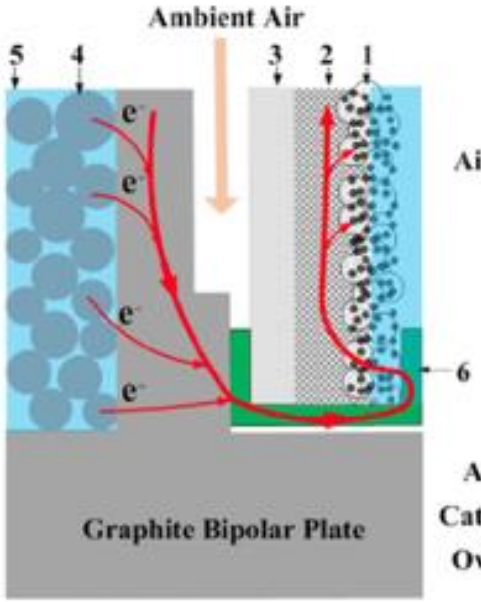
Fuel Cell Reactions

Cathode: $\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2\ OH^-$

Anode: $Zn + 2OH^- \rightarrow ZnO + H2O + 2e^-$

Overall Reaction: $Zn + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow ZnO$

Zinc and air are fed to the fuel cell.
ZnO is removed by the flowing electrolyte.



Air Cathode
- 1-Active Layer: Carbon, MnO_2, PTFE
- 2-Current Collector Layer: Nickel mesh
- 3-Hydrophobic Layer: PTFE membrane

Anode
- 4-Zinc Pellet
- 5-KOH Electrolyte
- 6-Nickel Foil

Electrochemical Reactions:

Anode: $Zn + 4KOH \rightarrow K_2Zn(OH)_4 + 2K^+ + 2e^-$

Cathode: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$

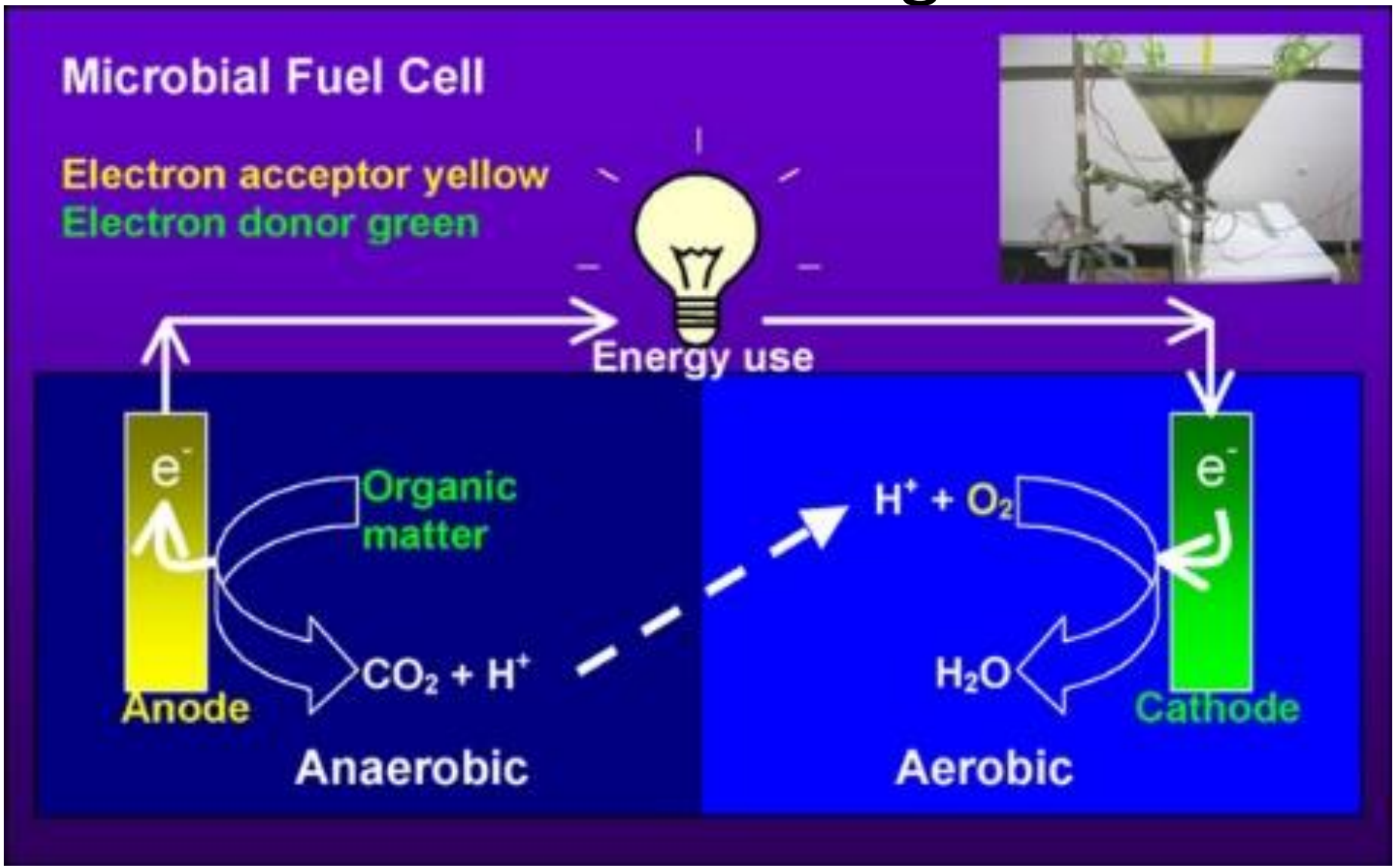
Overall: $2Zn + O_2 + 4KOH + 2H_2O \rightarrow 2K_2Zn(OH)_4$ $(E_0 = 1.65V)$

MILITARY APPLICATIONS

AER ENERGY RESOURCES, Inc.
Product: Mobile phoe (Nokia)
Fuel Cell: Zinc-Aire
Fuel: Zinc-Aire
Other: Operation times are around 3 and 12 times of those using conventional batteries supplied by Nokia.

FNEC Corp. FUNDAMENTAL RESEARCH LABORATORIES
Product: Fuel Cells for portable applications
Fuel Cell: PAFC
Comertial status: In development
Fuel: Hydrogen (hydride tank)
Power: 50 W
Other: Its small size, based on the use of structural components similar to carbon nanotubes allows supplying up to 10 times the energy supplied by a litium battery. Developing a model for labtops aiming to obtain operation times of days.

FC - Microbiológica



Principais Características

Célula Combustível (Tipo)	Eletrólito	Temperatura (°C)	Características	Combustível e Oxidante	Ion de Transp.
AFC (Alcalina)	Hidróxido de Potássio	50 - 120	Intolerante ao CO_2 (< 50 ppm)	Comb.: H_2 Oxidante: O_2+(H_2O)	OH^-
PAFC (Ácido Fosfórico)	Ácido Ortofosfórico	180 - 210	Moderadamente tolerante ao CO (< 2 %)	Comb.: GN ou H_2 Oxidante: Ar	H^+
PEMFC (Membrana Polimérica)	Ácido Sulfônico em Polímero	60 - 110	Intolerante ao CO (< 10 ppm)	Comb.: GN, Metanol ou H_2 Oxidante: Ar	H^+
DMFC (Metanol Direta)	Ácido Sulfúrico ou Polimérico	45 - 100		Comb.: Metanol Oxidante: Ar	H^+
MCFC (Carbonato Fundido)	Mistura de Carbonatos de Lítio e Potássio	630 - 650	Totalmente tolerante ao CO	Comb.: GN, Gás de Síntese Oxidante: Ar + CO_2	CO^{3-}
SOFC (Óxido Sólido)	Zircónia estabilizada com Ytria	900 - 1000	Totalmente tolerante ao CO	Comb.: GN, Gás de Síntese Oxidante: Ar	O^-

Serra e Furtado, 2006

CaC e sua relação com alguns gases:

Tipo de gás	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H_2	Combustível	Combustível	Combustível	Combustível	Combustível
CO	Veneno (reversível) (50 ppm por pilha)	Veneno	Veneno (<0,5%)	Combustível[a]	Combustível
CH_4	Diluído	Veneno	Diluído	Diluído[b]	Combustível[a]
CO_2 & H_2O	Diluído	Veneno	Diluído	Diluído	Diluído
S (H_2S & COS)	-	Veneno	Veneno (<50 ppm)	Veneno (<0,5 ppm)	Veneno (<1 ppm)

a) Na realidade, CO com H_2O muda para H_2 e CO_2, e CH_4 com H_2O são reformados em H_2 e CO mais rápido do que reagindo como um combustível no eletrodo.
b) Um combustível na reforma interna da MCFC.

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Eletrólito	Membrana de troca de íon polimérico	Hidróxido de potássio	Ácido fosfórico líquido em SiC	Carbonato fundido líquido em $LiAlO_2$	Cerâmica
Eletrodos	Carbono	Metais de transição	Carbono	Níquel e Óxido Níquel	Metal
Catalisador	Platina	Platina	Platina	Material do eletrodo	Material do eletrodo
Interconectores	Carbono ou metal	Metal	Grafite	Aço inoxidável ou Níquel	Níquel, cerâmica ou aço
Temperatura de operação	40 – 80°C	65°C – 220°C	205°C	605°C	600-1000°C
Portadores de carga	H^+	OH^-	H^+	$CO_3^=$	$O^=$
Reformadores	Sim	Sim	Sim	Não, só para alguns combustíveis.	Não, só para alguns combustíveis
Conversores de CO para hidrogênio	Sim, mais purificação para remover rastros de CO	Sim, mais purificação para remover rastros de CO e CO_2	Sim	Não	Não
Componentes das células primárias	Baseada em carbono	Baseada em carbono	Baseada em grafite	Baseada em aço inoxidável	Cerâmica
Controle da água produzida	Evaporação	Evaporação	Evaporação	Produtos gasosos	Produtos gasosos
Controle do calor produzido	Processamento do gás + Trocadores	Processamento do gás + Circulação do eletrólito	Processamento do gás + Trocadores ou geração de vapor	Reforma interna + Processamento do gás	Reforma interna + Processamento do gás

CaC quanto a Aplicação

Fuel Cell Type	Operating Temperature	System Output	Efficiency	Applications
Alkaline (AFC)	90–100°C 194–212°F	10kW–100kW	60–70% electric	• Military • Space
Phosphoric Acid (PAFC)	150–200°C 302–392°F	50kW–1MW (250kW module typical)	80–85% overall with combined heat and power (CHP) (36–42% electric)	• Distributed generation
Polymer Electrolyte Membrane or Proton Exchange Membrane (PEM)*	50–100°C 122–212°F	<250kW	50–60% electric	• Back-up power • Portable power • Small distributed generation • Transportation
Molten Carbonate (MCFC)	600–700°C 1112–1292°F	<1MW (250kW module typical)	85% overall with CHP (60% electric)	• Electric utility • Large distributed generation
Solid Oxide (SOFC)	650–1000°C 1202–1832°F	5kW–3 MW	85% overall with CHP (60% electric)	• Auxiliary power • Electric utility • Large distributed generation

Source: Argonne National Laboratory

**Direct Methanol Fuel Cells (DMFC) are a subset of PEMFCs typically used for small portable power applications with a size range of about a subwatt to 100W and operating at 60–90°C.*

Baixa T x Alta T

	Pilhas de combustível de baixa temperatura	Pilhas de combustível de alta temperatura
Tecnologias aplicáveis	• AFC • PAFC • PEFC/PEM	• MCFC • SOFC
Dimensão típica	• Os produtos disponíveis no mercado e em desenvolvimento têm potências até 250 kW	• A maioria dos equipamentos em desenvolvimento tem potências na ordem de 2 MW, mas existem planos para desenvolver unidades com menos de 1MW
Vantagens	• Emissões reduzidas • Arranque rápido (especialmente as PEMFC) • Potencial para a redução do custo resultante da produção em larga escala se for alcançado sucesso na área dos transportes	• Emissões reduzidas • Processamento de combustível mais simples • Não existe a necessidade de utilizar catalisadores de metais nobres • Não são danificadas pelo CO • Potências mais elevadas
Desvantagens	• Potencial de cogeração limitado • Processamento de combustível relativamente complexo • Mais sensível ao CO • Requer catalisadores de metais nobres • Custo elevado (PAFC)	• Mercado limitado inicialmente à produção de eletricidade (o que reduz o potencial para redução do custo) • Complexidade dos sistemas híbridos

Desvantagens específicas...

Tabela 1. Tipos de Células a Combustível.

Tipo	Eletrólito (espécie transportada)	Faixa de Temp. (°C)	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Alcalina (AFC)	KOH (OH^-)	60 – 90	- Alta eficiência (83% teórica)	- Sensível a CO_2 - Gases ultra puros, sem reforma do combustível	- Espaçonaves - Aplicações militares
Membrana (PEMFC)	Polímero: Nafion® (H_3O^+)	80 - 90	- Altas densidade de - Operação flexível	- Custo da membrana potência e eficiência - Contaminação do catalisador com CO	- Veículos automotores e catalisador - Espaçonaves - Mobilidade
Ácido fosfórico (PAFC)	H_3PO_3 (H_3O^+)	160 - 200	- Maior desenvolvimento tecnológico	- Controle da porosidade do eletrodo - Sensibilidade a CO - Eficiência limitada pela corrosão	- Unidades estacionárias - Unidades estacionárias (100 kW a alguns MW) - Cogeração eletricidade/ calor
Carbonatos fundidos (MCFC)	Carbonatos Fundidos (CO_3^{2-})	650 - 700	- Tolerância a CO/CO_2 - Eletrodos à base de Ni	- Problemas de materiais - Necessidade da reciclagem de CO_2 - Interface trifásica de difícil controle	- Unidades estacionárias de algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/ calor
Cerâmicas (SOFC)	ZrO_2 (O^{2-})	800 – 900	- Alta eficiência (cinética favorável) - A reforma do combustível pode ser feita na célula	- Problemas de materiais - Expansão térmica - Necessidade de pré-reforma	- Unidades estacionárias de 10 a algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/ calor

Götz e Linardi, 1999

Vantagens x Desvantagens (Geral):

- **Perspectiva de alta eficiência e confiabilidade;**
- **Excelente desempenho em cargas parciais;**
- **Ausência ou baixas emissões;**
- **Expectativa de intervalos elevados entre falhas;**
- **Silenciosas pela ausência de partes móveis;**
- **Modularidade e operação remota;**
- **Flexibilidade de utilização de combustíveis**
- **Vida útil limitada (vida útil real desconhecida);**
- **Eficiência elétrica decrescente ao longo da vida;**
- **Investimento inicial ainda muito elevado;**
- **Poucas unidades de demonstração;**
- **Poucos provedores da tecnologia;**
- **Tecnologia pouco divulgada para geração estacionária;**

Aspectos Comerciais

Empresas Internacionais

Company	Products
ElringKlinger AG[1]	PEMFC (NM5 (6-70 kW),[2] NM12 (30-150 kW),[3] Module (100kW, Customized)[4]
Ceramic Fuel Cells[5]	BlueGen
Bloom Energy[6]	Bloom Energy Server "BloomBox"
Doosan Fuel Cell America[7]	PureCell Model 400 and SOFC[8]
Robert Bosch GmbH[9]	PEMFC and SOFC[10]
Powercell	PEMFC S3, S2 and Module[11]
Plug Power Inc.	GenDrive, GenSure, ProGen[12]
GenCell	Energy / Power for Humanity
Horizon	ECOBOC-MR, Aerostack, Hydromax[13]
Intelligent Energy	FCM-800
Toshiba	Ene-Farm,[14] H2Rex[15]
Fuel Cell Energy	SureSource 1500, 3000, 4000
Ceres Power	Solid oxide fuel cell[8][10][16]

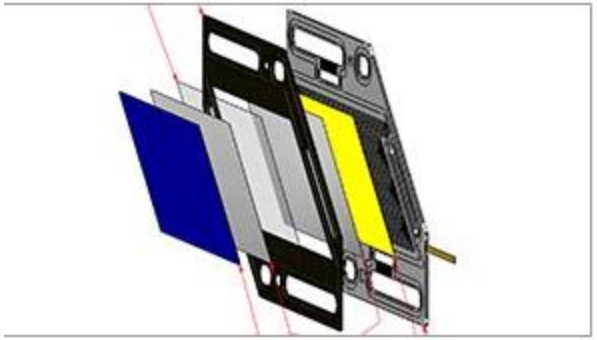
Empresas Nacionais

BRASIL H2
FuelCellEnergy

Engenheiro elétrico Emílio Hoffmann fundou a H2 Brasil em 2003 - Foto: Albari Rosa/Gazeta

GRUPO
ELECTROCELL®
CÉLULAS A COMBUSTÍVEL

NOVOCELL
SISTEMAS DE ENERGIA S/A



COMPONENTES PARA CELULAS COMBUSTIVEL

BANCADAS

ENGENHARIA, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

Filter

What are you looking for...

Related Searches: fuel cell | pem fuel cell | solid oxide fuel cell | fuel cell in china

Hydrogen Propane Gas Nailer **Fuel Cell**

US $1.2-2.5 / Piece

2400 Pieces (Min. Order)

Chongqing Liyufujie Trading C...

BIOBASE High Purity **Hydrogen** Generator for Car

US $600-950 / Set

1 Set (Min. Order)

Zhangqiu Meihua Internationa...

PEM OEM **Hydrogen** Oxygen **Fuel Cell**

1 Piece (Min. Order)

Hangzhou Brolight Technolog...

500ml SPE Water Electrolysis **Cell** for

US $500-900 / Set

1 Set (Min. Order)

Zhejiang Nade Scientific Instru...

fuel cell stack

US $800.0-1200.0 / Pieces

10 Pieces (Min. Order)

Hengshui Yuanbo Import And ...

YNF SERIES **HYDROGEN FUEL CELL** POWER

US $1000-50000 / Set

1 Set (Min. Order)

Fujian Fuan Mindong Yanan E...

3LPM flow **Hydrogen** Generator---PEM

US $0.0001-7000 / Set

1 Set (Min. Order)

Shandong Saikesaisi Hydroge...

Environmental protection oxygen **hydrogen** generator

US $3000-10000 / Set

1 Set (Min. Order)

Hunan Topo Oxy-Hydrogen Ge...

water **hydrogen fuel cell** generator for boiler

US $1-100000 / Set

1 Set (Min. Order)

Changsha Kingkar Eco-Techno...

Hydrogen generator

US $600-1000 / Set

1 Set (Min. Order)

GSM (Beijing) Enterprises Co., ...

RFQ

TOP

Célula De Combustível De Hic

https://www.aliexpress.com/hydrogen-fuel-cell_reviews.html

Carrinho | Desejos | Meu AliExpress

Início > comentários > "célula de combustível de hidrogênio" 3 Resultados

Categorias relacionadas

- Brinquedos
- Automóveis & Motos
  - Sensor De Oxigênio dos Gases de escape
- Mãe & Kids

Célula a combustível de hidrogênio experimento Eu ensino médio novo padrão de ensino ensino instrumento instrumento de ensino de...

Komego Trading Co.,Ltd

R$ 318,48 / item

Envio: R$ 15,39 / item via China Post Registered Air Mail

Feedback (2) | Pedidos (4)

Adicionar à Lista

Ensino de química experimento II PEM célula a combustível de Hidrogênio eletrolisador de água não está equipado frete grátis

Komego Trading Co.,Ltd

R$ 192,90 / item

Envio: R$ 15,39 / item via China Post Registered Air Mail

Feedback (1) | Pedidos (2)

Adicionar à Lista

Frete grátis ME3-H2 sensor de hidrogênio eletroquímica sensor de gás Sensor de Gás H2 Usando Combustível tóxico **Cell**.2PPM 0-1000...

R$ 358,28 / lote

2 itens / lote

Frete grátis

Pedidos (0)

Visualizações Recentes

Iniciar | Livros | Curso CaC PUC Dez 2... | Célula De Combustíve... | PT | 15:05

Promoção de Pem Fuel Cell G

pt.aliexpress.com/promotion/promotion_pem-fuel-cell-generator-promotion.html

Proteção ao Consumidor | Ajuda | Economize muito em nosso App! | Enviar para / BRL | Go to Global Site (English)

AliExpress | pem fuel cell generator | 0 Carrinho | Lista de Desejos | Entre | Inscreva-se | Meu AliExpress

Início > promoção > "pem fuel cell generator" 6 Resultados

Categorias relacionadas

Melhoramento Da Casa

Geradores de Energia alternativa

Ver todas as 3 Categorias

Célula de combustível **PEM** Celular + eletrolisador para

R$ 184,46 / item

Envio: R$ 92,00 / lote via e-EMS

(2) | Pedido (1)

Célula de combustível **PEM** Celular + eletrolisador para

R$ 184,80 / item

Envio: R$ 86,40 / lote via e-EMS

(4) | Pedidos (6)

Célula de combustível **PEM** Celular + eletrolisador para

R$ 188,73 / item

Envio: R$ 92,00 / lote via e-EMS

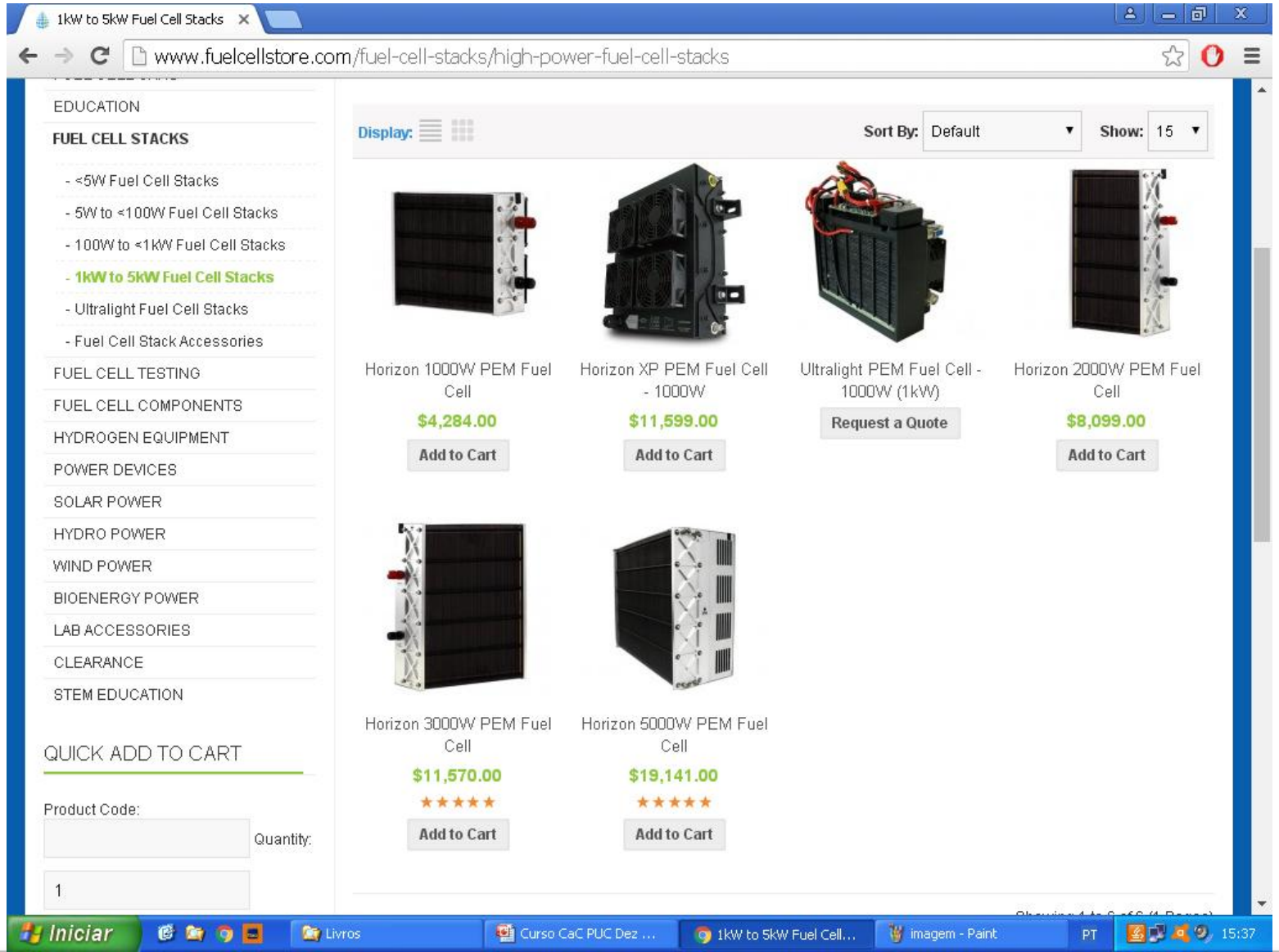
(3) | Pedidos (4)

Visualizações Recentes

Conectando...

Iniciar | Livros | Curso CaC PUC Dez 2... | Promoção de Pem Fu... | PT | 15:03

Produtos Comerciais e $$$



Patentes no Mundo:

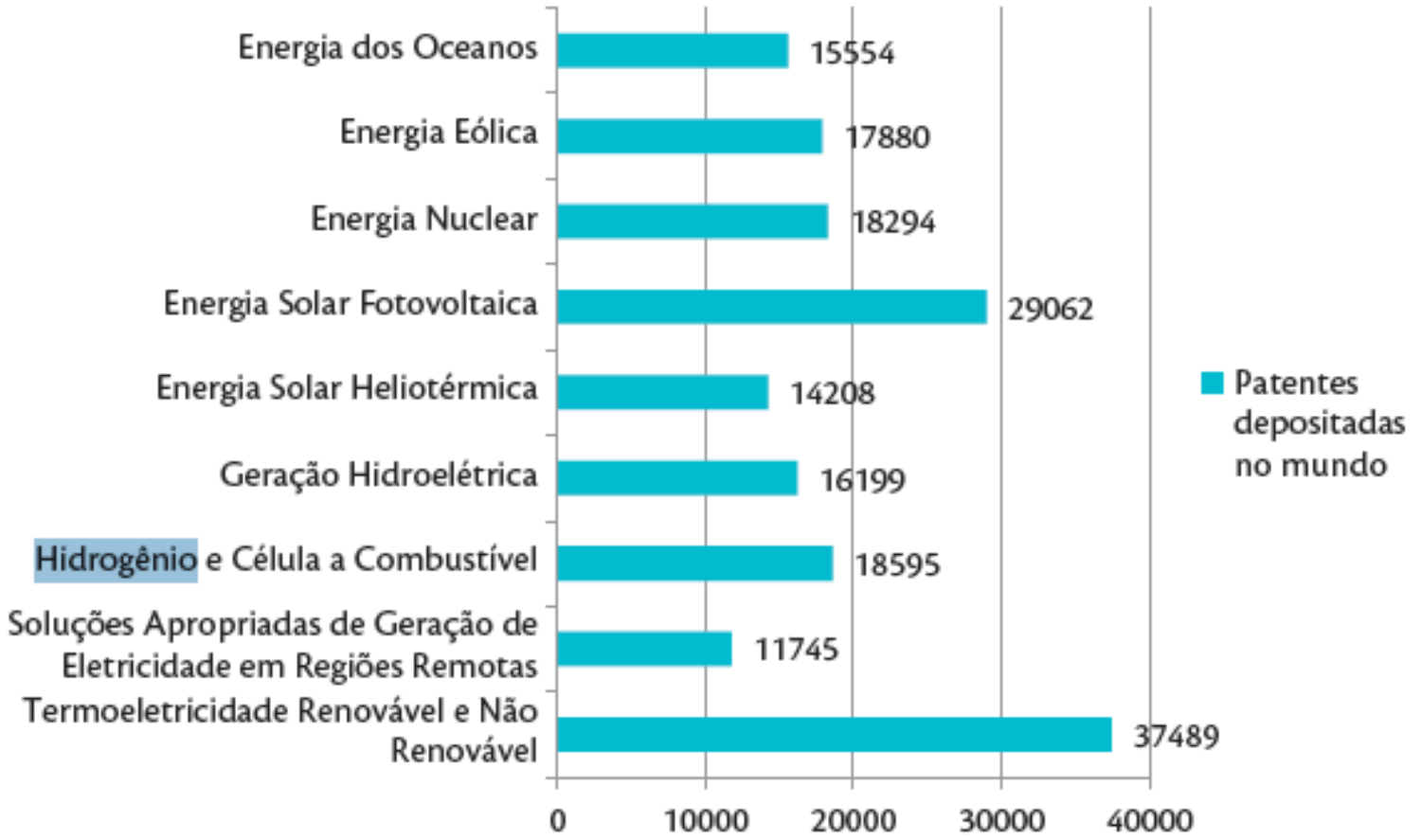


Gráfico 29 - Patentes depositadas no mundo por macrotemática do GT Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia

Patentes no Brasil

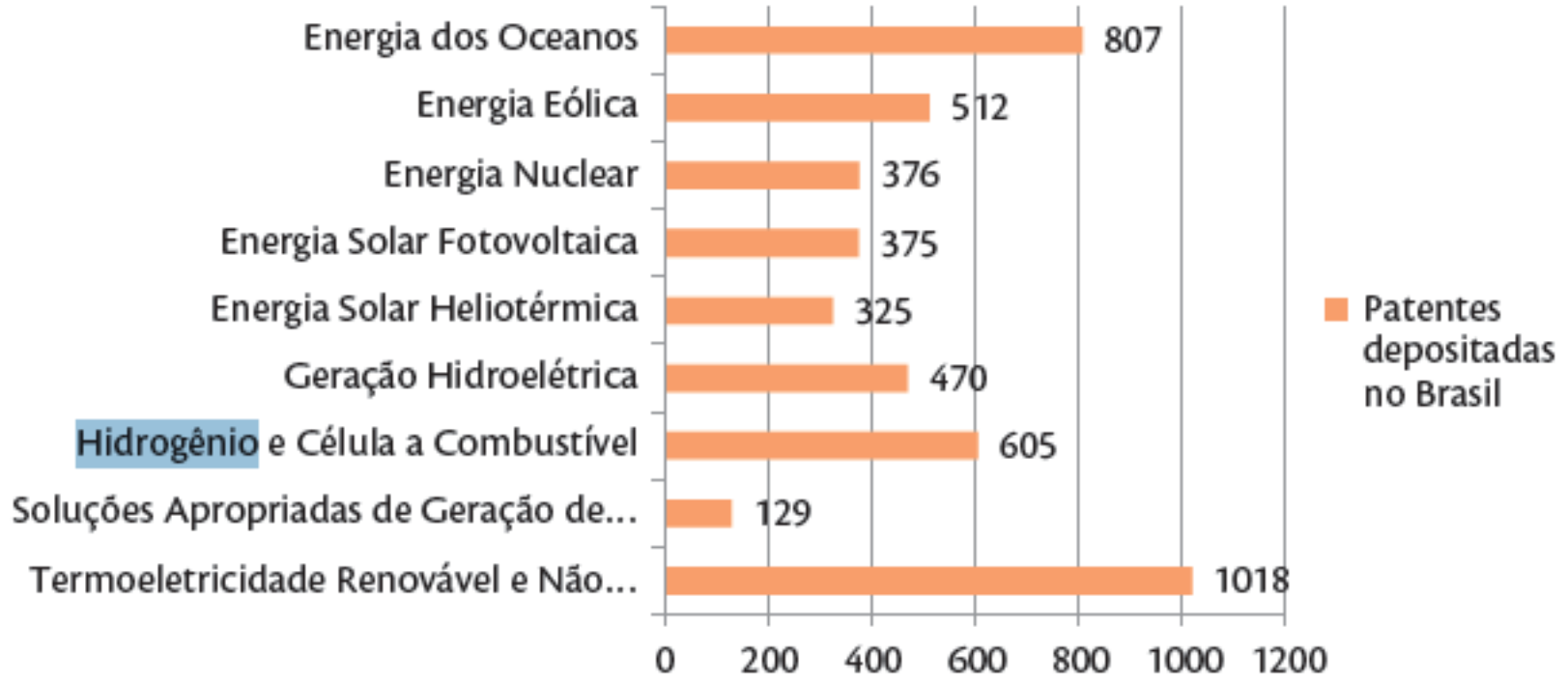


Gráfico 30 - Patentes depositadas no Brasil por macrotemática do GT Geração de Energia Elétrica e Armazenamento de Energia

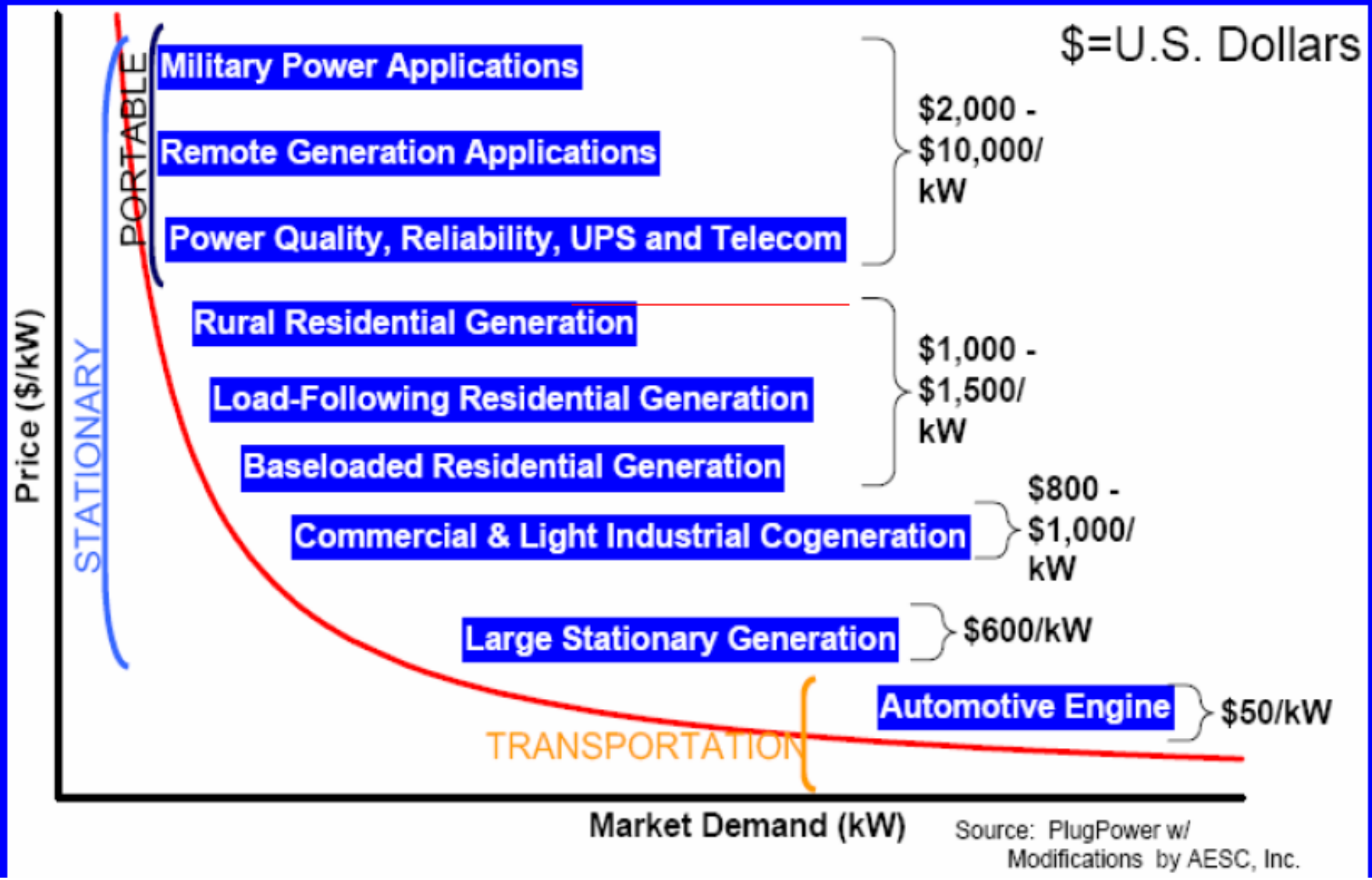
Hidrogênio e Célula a Combustível	TOYOTA	16
	COMMISSARIAT ENERGIE ATOMIQUE	8
	GENERAL ELECTRIC CO	7

Comparação com Outras Tecnologias de GD:

Generator	Range	Approx. Cost	Ton/kW
Gas Turbine	> 1 MW	$500 /kW	.60
IC Engine	.1 to 3 MW	$500 /kW	.35
Microturbine	< .4 MW	$1,000 /kW	.35
Fuel Cell	> .25 MW	$3,700 /kW	.16

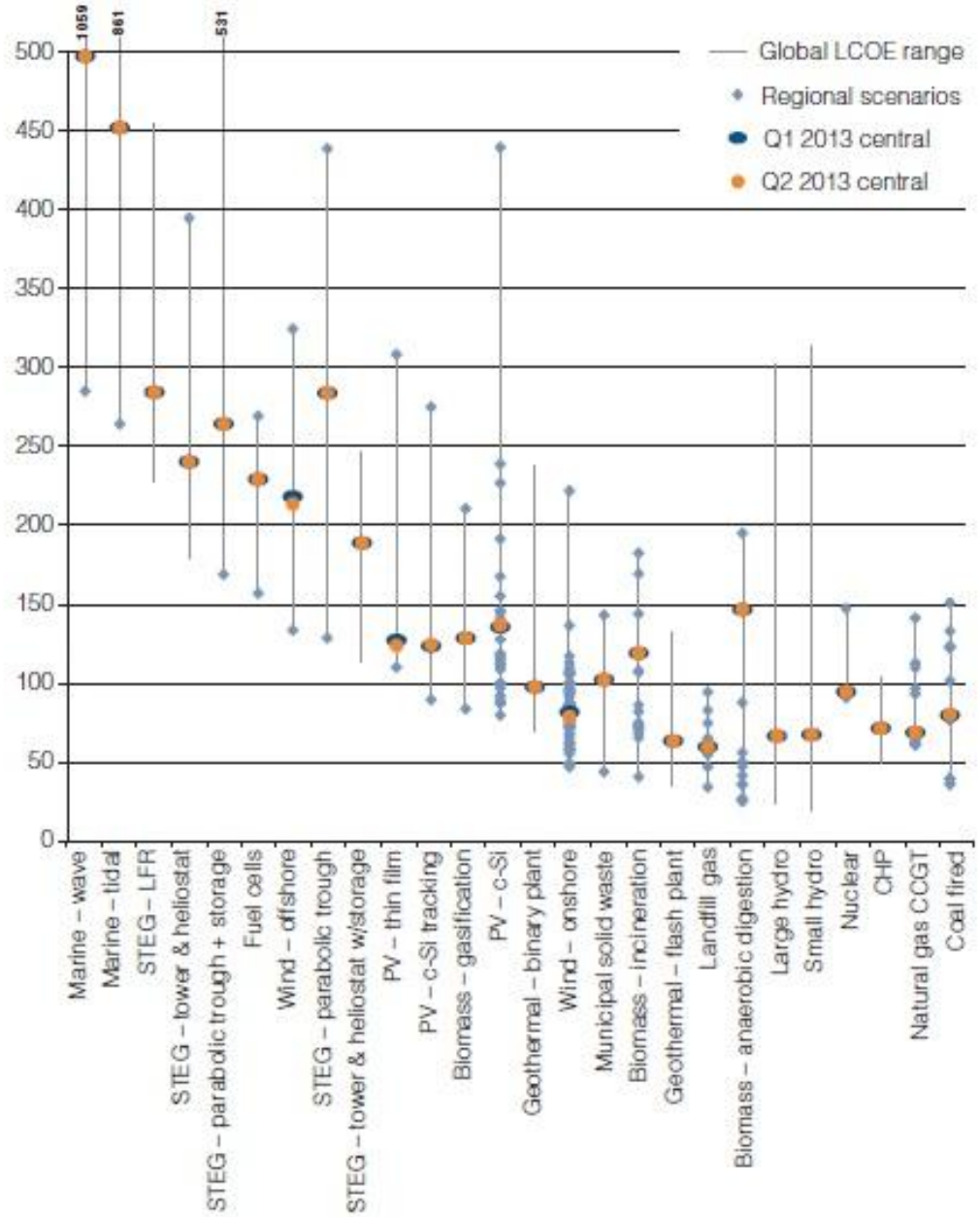
Electo, 2006

Fuel cell applications



Almeida, 2003

Figure 3
Global levelised cost of energy in Q2 2013 (USD/MWh)
Source: Bloomberg New Energy Finance



Inserção no Mercado
Fatores Críticos

CEPEL
Grupo Eletrobrás

Mercado ⇒ Parâmetros ⇓	Doméstico	Comercial	Industrial
Gás natural (US$/kWh)	0,02 – 0,04	0,02 – 0,04	0,01 – 0,03
Energia Elétrica (US$/kWh)	0,08 – 0,16	0,08 – 0,16	0,04 – 0,12
Vida Útil da CaC (Anos) ⇒	5 – 12	5 – 12	5 – 12
Investimento "aceitável" (US$/kW)	600 1400	400 1800	500 800

Unidade PEMFC tamanho (kW)	Baixo Volume de Produção (10.000 unid/ano)		Alto Volume de Produção (100.000 unid/ano)	
	Preço (US$/unid.)	US$/kW	Preço (US$/unid.)	US$/kW
10 kW	16.000	1.600	5.000	500
25 kW	25.000	1.000	7.500	300
50 kW	40.000	800	12.000	240

Energia das Concessionárias:

Tarifa B4 ()Cemig –fev;21): R$ 0,64-0,70/kWh →USD 0,11—0,12

Energia para consumidor (Cemig;Fev-21): R$1,00/kWh →USD 0,18

Serra e Furtado, 2006

Eficiência e Custo Relativo dos Componentes

Componente	Eficiência	Custo Relativo
Reformador (Processador de combustível)	79%	40%
Empilhamento de CaC (*Fuel Cell Stack*)	57%	27%
Condicionamento de Potência	95%	18%
Controle e Instrumentação	90%	15%
Total	39%	100%

Inserção no Mercado
Fatores Críticos

CEPEL
Grupo Eletrobrás

- Custo (produção, instalação e manutenção);
- Escala de produção (unidades por ano);
- Número de fabricantes de componentes e unidades;
- Receptividade da sociedade (segurança, normas, padrões);
- Concorrência entre mercados de energia elétrica e insumos (GN, hidrogênio, etanol, metanol, etc);
- Eficiência e durabilidade;
- Competição entre tecnologias de GD e entre tecnologias de CaC;
- Evolução tecnológica (tolerância a contaminantes, materiais e engenharia dos componentes e engenharia de operação/controle).

Considerações- Tópico 3

Aspectos Teóricos Sobre Células a Combustível

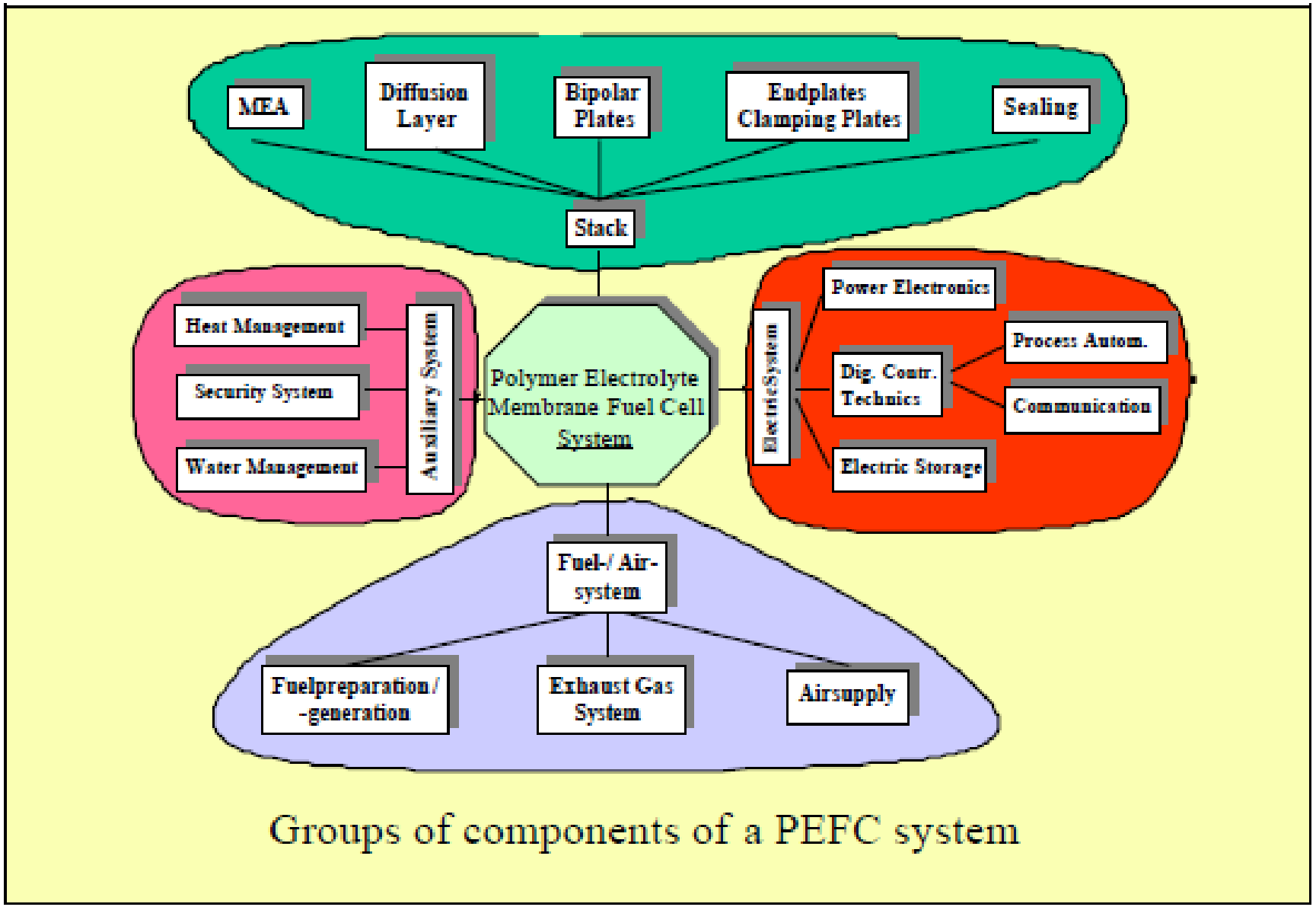


figure 4: main components of a PEFC-system

Birnibaum, 2003

Eletroquímica Básica

Célula a Combustível são baseadas em reações de oxi-redução.

São reações em que ocorre a troca de elétrons entre espécies diferentes

$$A + B \rightarrow A^{+} + B^{-}$$

REDOX

ELECTRICITY

Ocorre a produção de eletricidade se houver condições adequadas .

Ao menos 2 agentes químicos participam da Reação de REDOX

$$A + B \rightarrow A^{+} + B^{-}$$

FUEL

$$A \rightarrow A^{+} + e^{-}$$

- **Composto que é Oxidado;**
- **Ele cede elétrons → Redutor**
- **Exemplos: H_2, metanol, etanol, CO, CH_4...**

OXIDANT, CARBURANT

$$B + e^{-} \rightarrow B^{-}$$

- **Composto que é Reduzido;**
- **Ele recebe elétrons → Oxidante**
- **Exemplos: O_2, Ar.**

A capacidade de produzir trabalho elétrico (Wel) é dada pelo POTENCIAL ELÉTRICO (E)

Eletroquímica Básica

Quando o Hidrogênio gasoso é utilizado como combustível no anodo:

	Oxidation	$\longrightarrow$ $H_2(g) + \rightarrow 2H^+(aq) + 2e^-$	$E^0 = 0$ V
+	Reduction	$\longrightarrow$ $2H^+(aq) + 2e^- + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(l)$	$E^0 = 1.229$ V
	Overall reaction	$\longrightarrow$ $H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(l)$	$E^0 = 1.229$ V

Se o produto da reação for água líquida

	Oxidation	$\longrightarrow$ $H_2(g) + \rightarrow 2H^+(aq) + 2e^-$	$E^0 = 0$ V
+	Reduction	$\longrightarrow$ $2H^+(aq) + 2e^- + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(g)$	$E^0 = 1.180$ V
	Overall reaction	$\longrightarrow$ $H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(g)$	$E^0 = 1.180$ V

Se o produto da reação for vapor de água

Eletroquímica Básica

A Reação Global de CaC coincide com a reação de Combustão.

$$H_2\,(g) + \tfrac{1}{2}O_2\,(g) \rightarrow H_2O\ (g)$$

De forma a se obter Eletricidade é NECESSÁRIO que as reações de Oxidação e Redução ocorram e LOCAIS DIFERENTES!

$$H_2\,(g) + \rightarrow 2H^+(aq) + 2e^-$$

$$E^0 = 1.229\ V$$

$$2e^- + \tfrac{1}{2}O_2\,(g) \rightarrow H_2O\,(g)$$

Termodinâmica Básica

- Fuel + oxidant → H_2O + other products + electricity
- $H_2 + ½\ O_2 \rightarrow H_2O$, $\Delta H = 286$ kJ/mol
- Enthalpy that can be converted to electricity in a fuel cell corresponds to Gibbs free energy.
- $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$
- $W_{el} = qE = nFE$
- $W_{el} = -\Delta G$
- $E_{theo} = \frac{-\Delta G}{nF} = \frac{237{,}340\ J/mol}{2 \times 96{,}485\ As/mol} = \mathbf{1.23\ V}$

$$\eta_{th,cell,max} = \frac{n_e F E^o}{HHV} = \frac{2 \times 96485 \times 1.23}{285840} = 0.83$$

HHV of H_2 = 285.84 *kJ/mol*; LHV = 241 *kJ/mole*

Termodinâmica Básica

- Effect of temperature
  - The theoretical potential of the fuel cell changes with temperature.
  - $E = -\left(\frac{\Delta H}{nF} - \frac{T\Delta S}{nF}\right)$---------- Eq. (1)
  - Increase in cell temperature results in lower E_{theo}.

T (K)	ΔH	ΔG	ΔS	E_{th} (V)
298.15	-286.02	-237.34	-0.16328	1.23
333.15	-284.85	-231.63	-0.15975	1.20
353.15	-284.18	-228.42	-0.15791	1.184
373.15	-283.52	-225.24	-0.15617	1.167

Change of enthalpy, Gibbs Free Energy, and Entropy of hydrogen/oxygen fuel cell reaction with temperature and resulting theoretical cell potential

Effect of pressure

- For the H_2/O_2 fuel cell reaction, the Nernst equation becomes:

$$\Delta G = \Delta G_O + RTln\left[\frac{P_{H2O}}{P_{H2}{P_{O2}}^{0.5}}\right]$$

- By introducing Eq (1),

$$\Delta E = \Delta E_O + \frac{RT}{nF} ln\left[\frac{P_{H2}{P_{O2}}^{0.5}}{P_{H2O}}\right]$$

- Therefore, cell potential is higher at higher reactant pressures.

Termodinâmica Básica

- Assuming that all of the Gibbs free energy can be converted into electrical energy, the maximum possible efficiency of a fuel cell is:

  $\eta = \Delta G / \Delta H = 237.34 / 286.02 = 83\%$

- Maximum theoretical fuel cell efficiency:

  $\eta = \Delta G / \Delta H_{LHV} = 228.74 / 241.98 = 94.5\%$

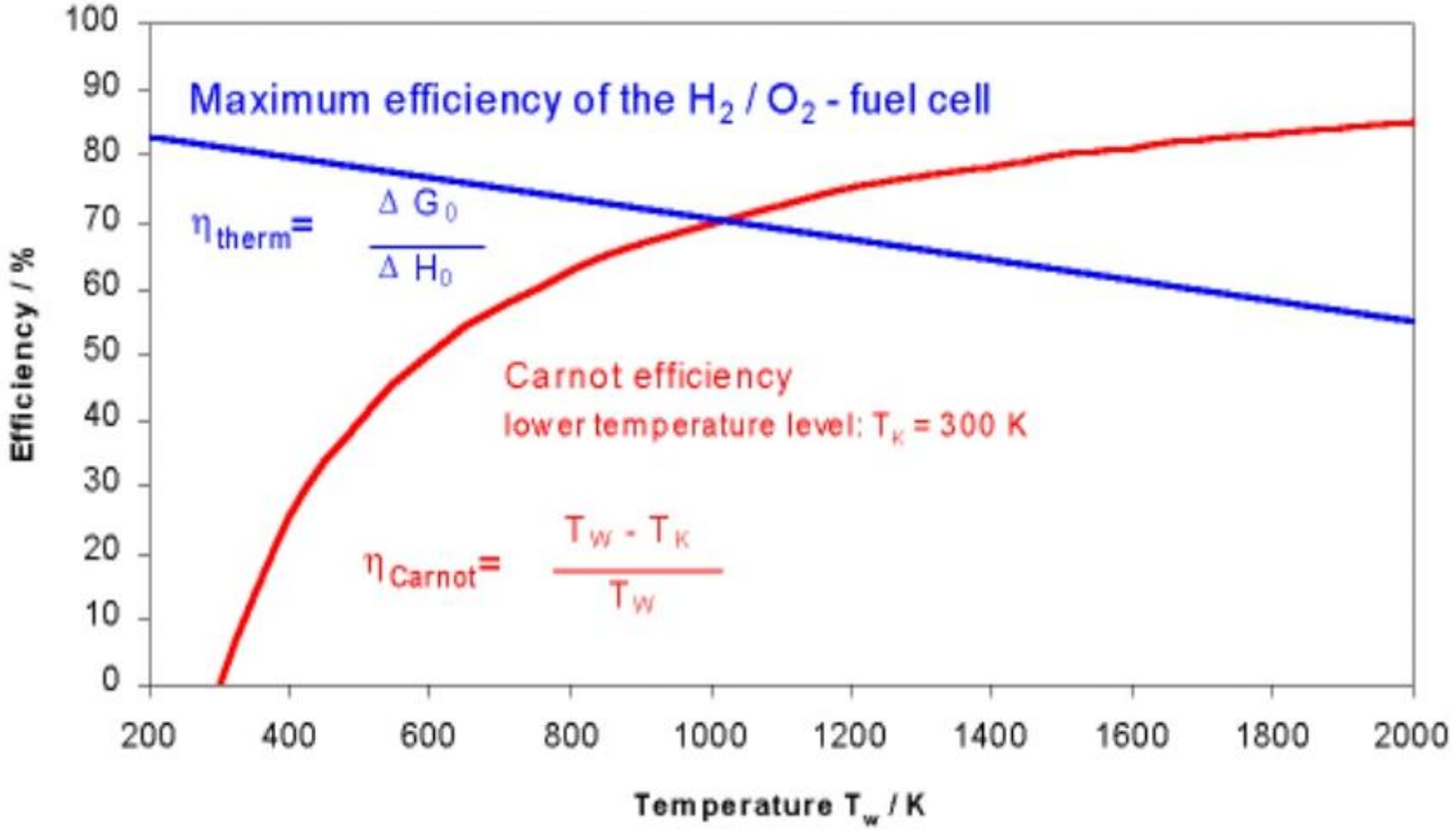
- If both $\Delta G / \Delta H$ are divided by nF, the fuel cell efficiency may be expressed as a ratio of two potentials:

  $\eta = (\Delta G/nF) / (\Delta H/nF)_{HHV} = 1.23/1.482 = 0.83$

- The fuel cell efficiency is always proportional to the cell potential.

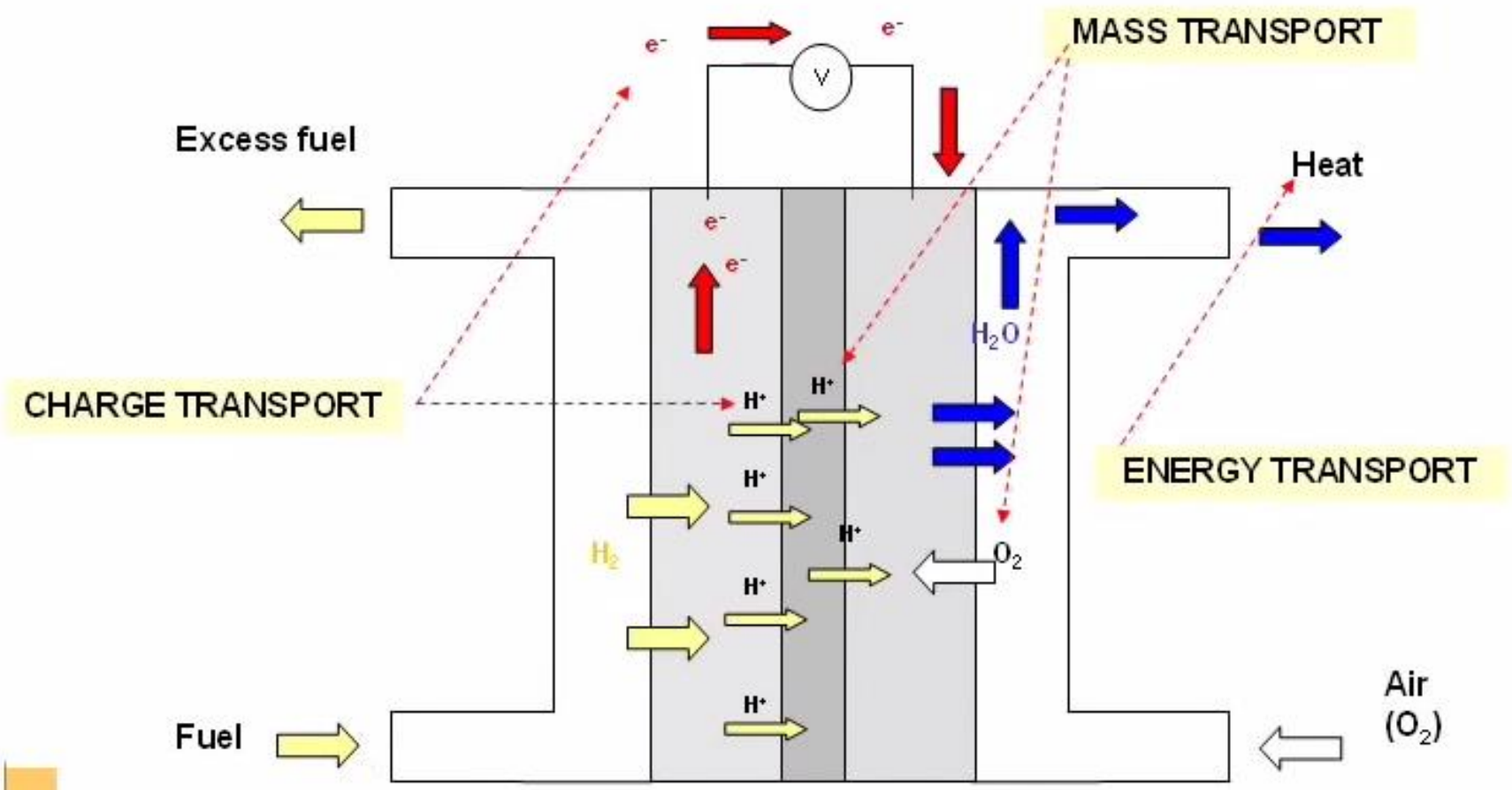
LHV (água da combustão na forma de vapor)
HHV (água da combustão na forma líquida)

HHV = LHV + Hv (nH20/nCombustível)



Vicente, 2008

Componentes:



$H_2 \leftrightarrow H_{2,\,ads}$ (4a)

$H_{2,\,ads} \leftrightarrow 2\ H_{ads}$ (4b)

$H_{ads} + H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + e^-$ (4c)

$O_2 \leftrightarrow O_{2,\,ads}$ (5a)

$O_{2,\,ads} + H^+ + e^- \leftrightarrow O_2H_{ads}$ (5b)

$O_2H_{ads} + H^+ + e^- \leftrightarrow H_2O_2$ (5c)

$H_2O_2 + 2\ H^+ + 2\ e^- \leftrightarrow 2\ H_2O$ (5d)

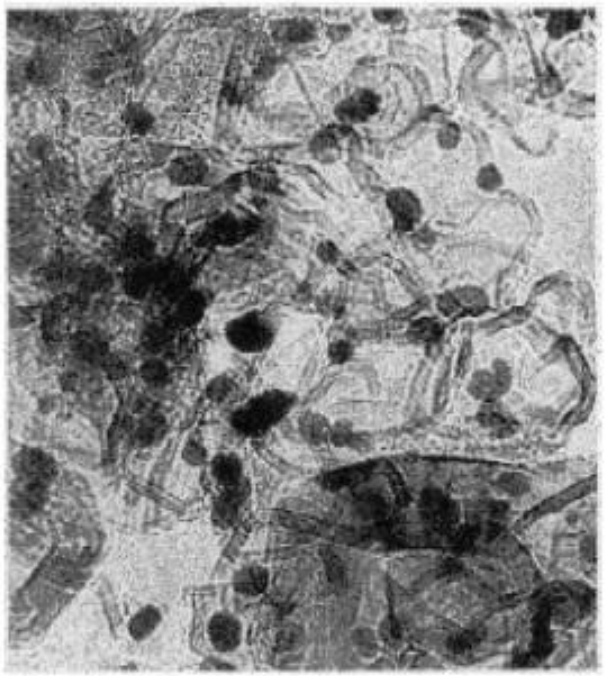
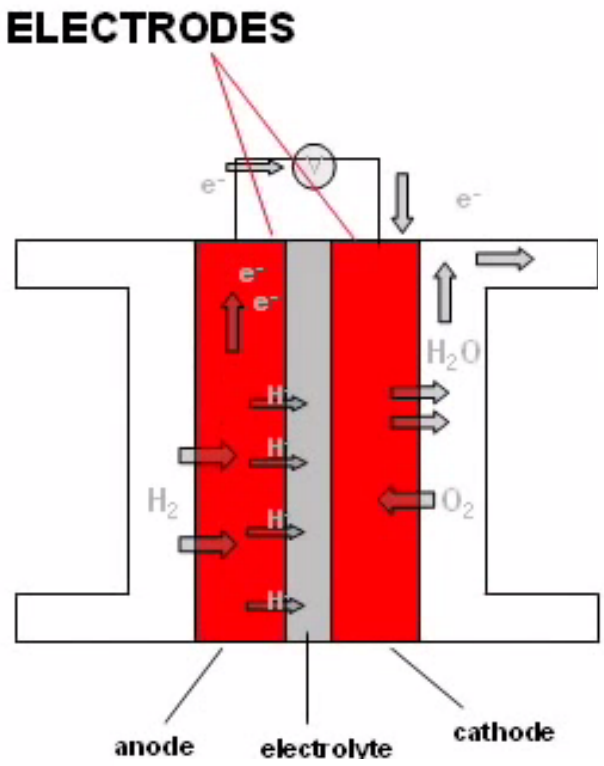


Figura 2. Microestrutura um catalisador de Pt obtida por microscopia eletrônica de transmissão (2.700.000X). As particulas de platina são os pontos escuros sobre o carbono grafitizado. (Fonte: Stoneheart

Mecanismo de Tafel-Volmer:

Reação de Tafel $H_{2,\,ads} \rightleftharpoons 2\ H_{ads}$

Reação de Volmer $H_{ads} + H_2O \rightleftharpoons H_3O^+ + e^-$



Os Eletrodos são onde as reações ocorrem

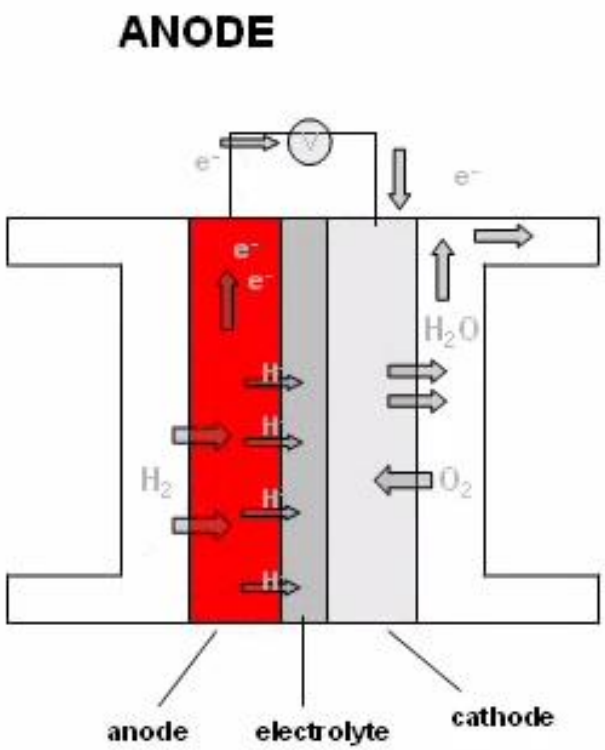
Anodic reaction: $H_2(g) \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Cathode reaction: $1/2O_2(g) + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$

Principais funções:

- **Prover a superfície para as reações de ionização**
- **Transferir os íons para a interface**
- **Separar a fase gasosa do eletrólito**

Components of a Fuel Cell

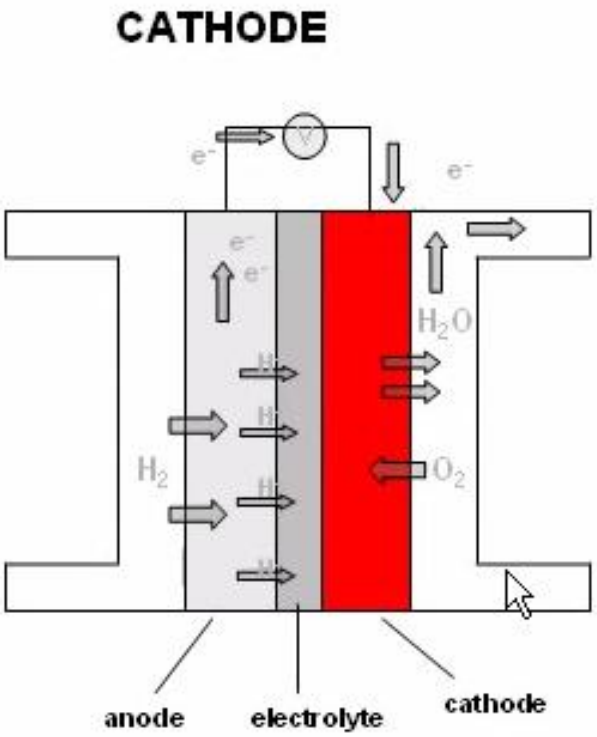


Local da Oxidação: Combustíveis...
Diferentes espécies entram em contato no ANODO:

- **Combustível não oxidado (gás ou líquido)**
- **Combustível já oxidado (solução)**
- **Superfície do anodo (sólido)**

O anodo consiste em um material poroso que possui uma alta área superficial. Partículas metálicas são adicionadas ao anodo de forma a fornecer a superfície para as reações eletroquímicas (catalisadores), aumentando o custo da célula.

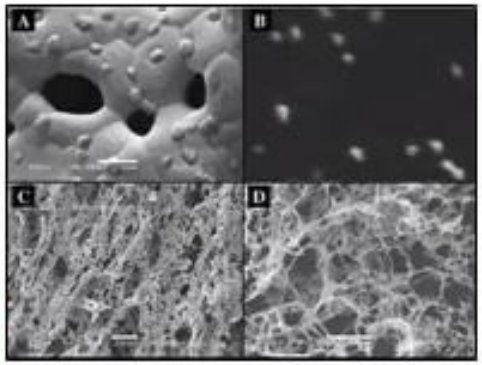
Components of a Fuel Cell



Local da Redução: Oxigênio

Diferentes espécies entram em contato no CATODO:

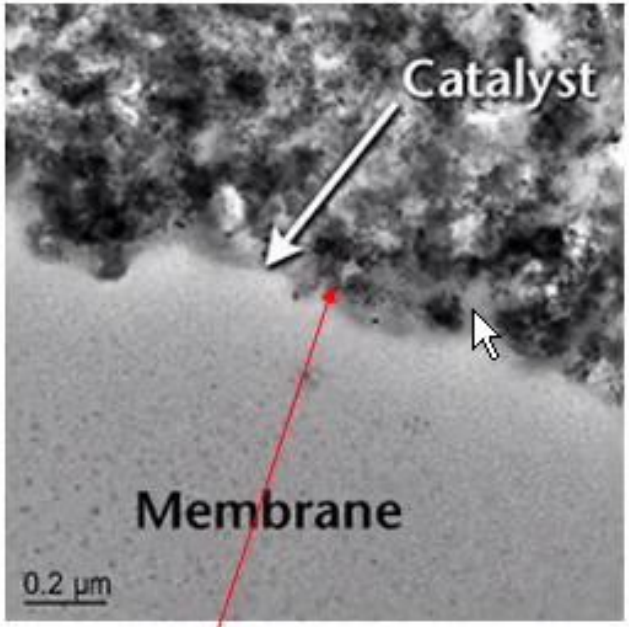
- **Oxigênio não reagido (gas)**
- **Produtos da reação (líquido)**
- **Íon oxidado (solução)**
- **Superfície do catodo (sólido)**



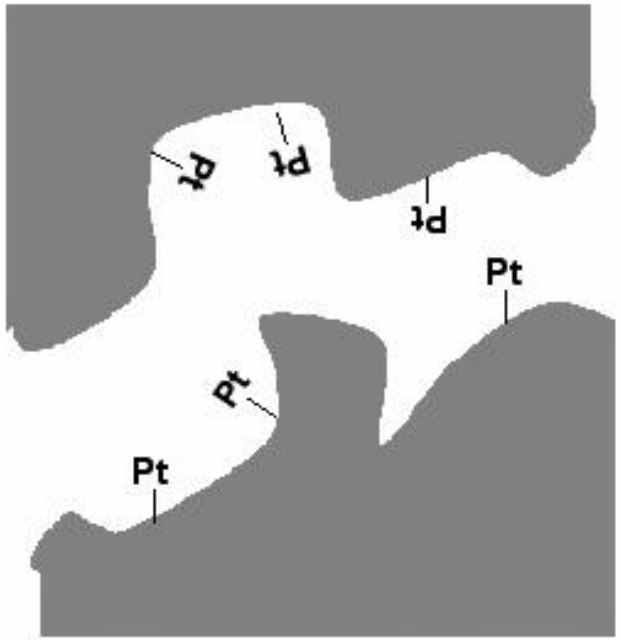
O catodo consiste usualmente da mesma constituição que o anodo: material poroso que contenha partículas catalíticas. Eles devem providenciar altas áreas superficiais entre as fases.

Electrodes

Porous material covered by Platinum particles

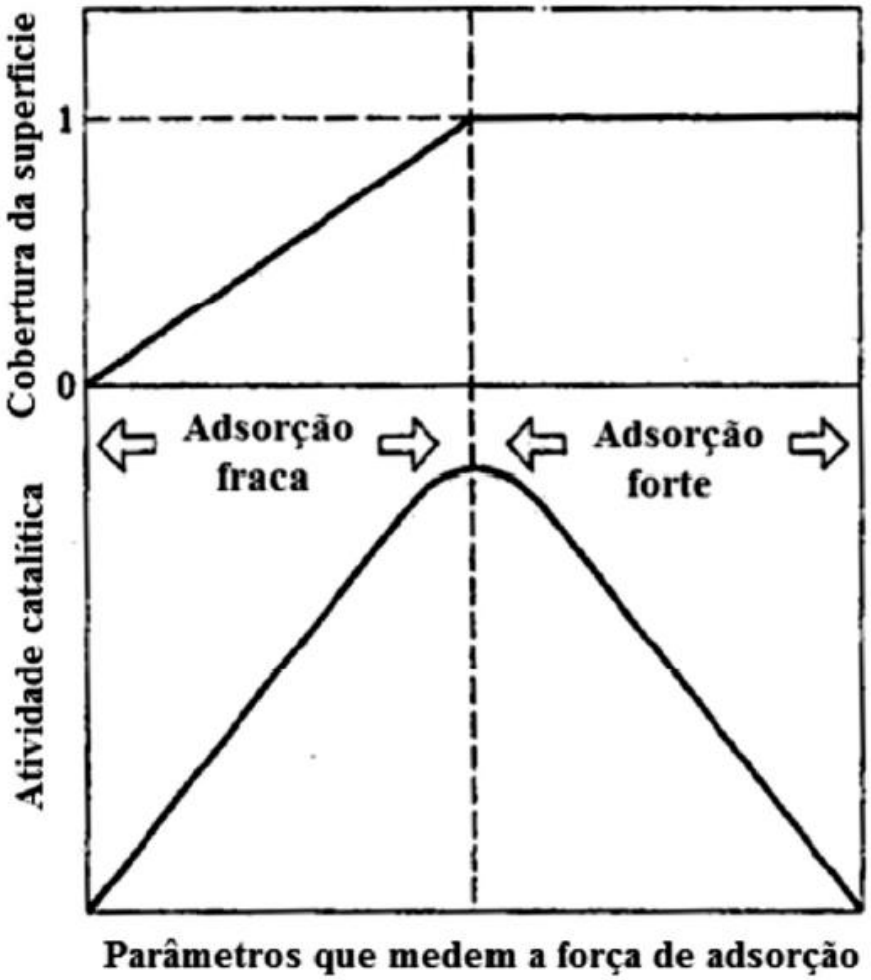


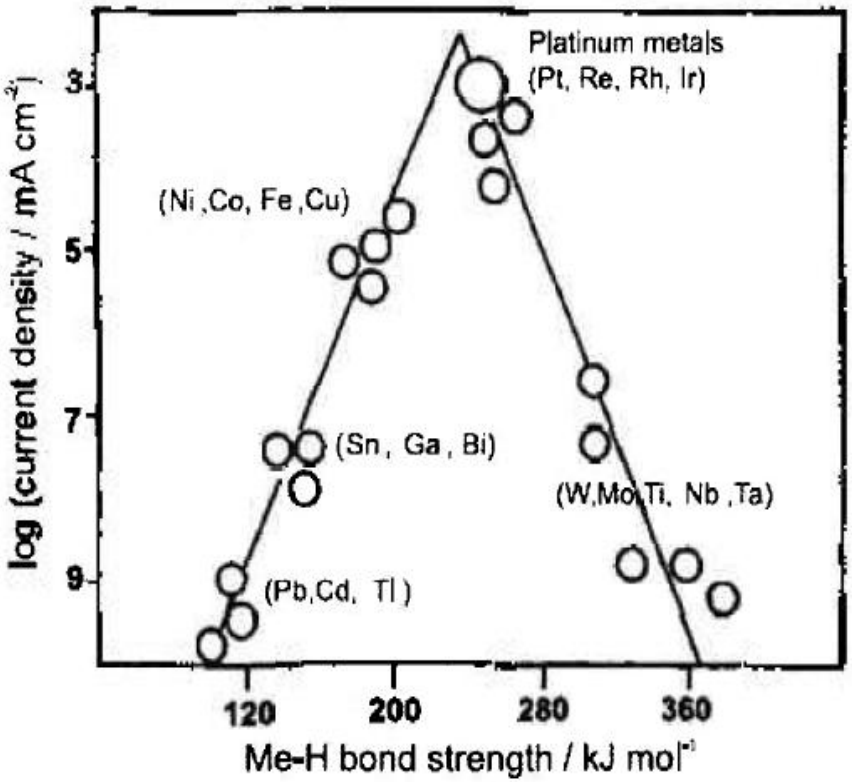
Usually carbon materials and Platinum



The MEA is usually prepared by syntherisation, to improve the interface between the Membrane and Electrodes

Curva de Vulcano





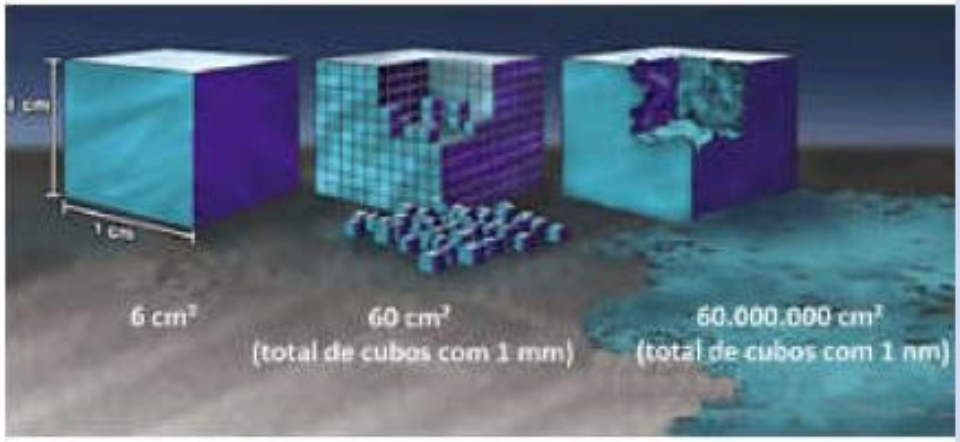
Correlaciona a energia
de adsorção com a densidade de corrente de intercâmbio da oxidação/evolução de Hidrogênio. (Franco, 2005)

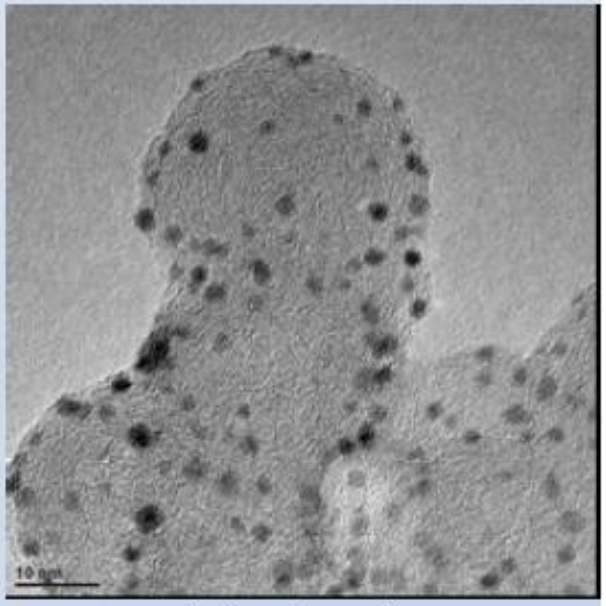
Fonte: Santos, A. R. dos (2007)

Utilização de Platina

➢ Uma das estratégias para maximar a utilização de Pt é a preparação de nanomateriais

• Aumento da área superficial.



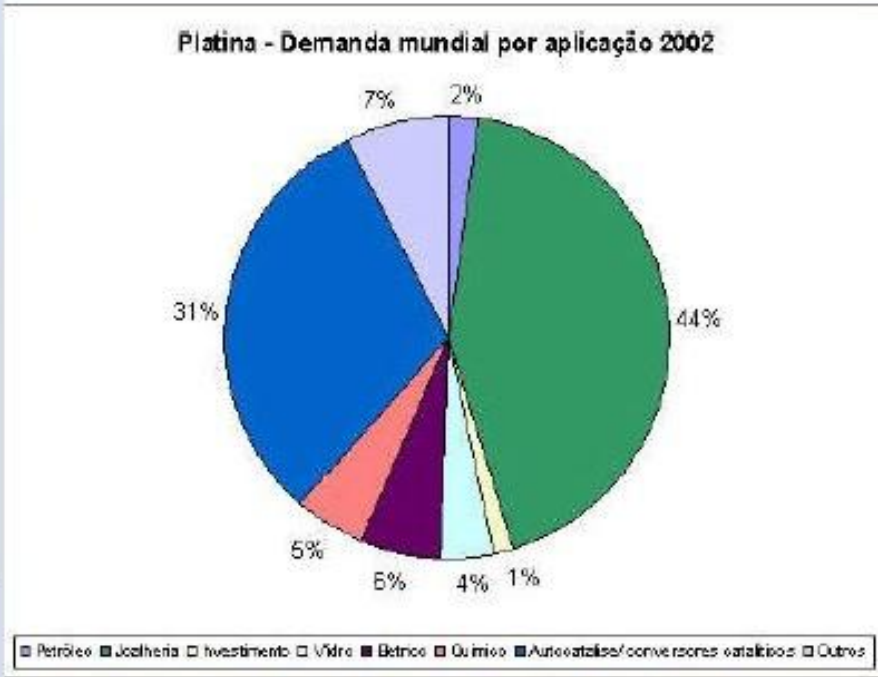


Nanopartículas de Pt/C

Utilização de Platina

➢ Se cada veiculo no planeta fosse movido a PEMFCs utilizando-se Pt como catalisador, seria requeridos cerca de 110000 toneladas de Pt, sendo que as reservas mundiais desse metal é cerca de 24000 toneladas.

✓ Pt mais cara que ouro.



Fonte: Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio

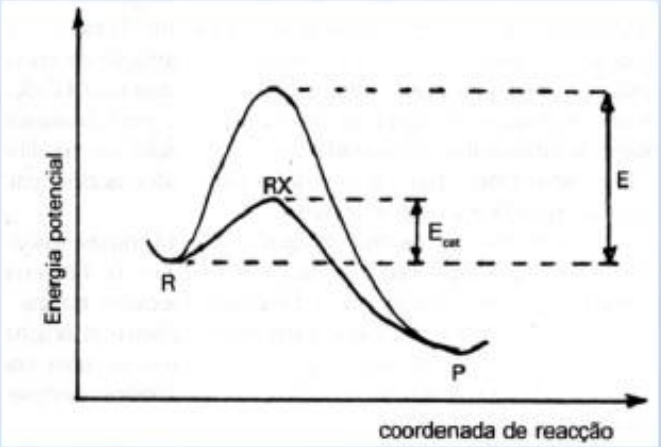
A. Brouzgou, S.Q. Song, P. Tsiakaras, Applied Catalysis B: Environmental 127 (2012) 371-388.

Desafios relacionados as células a combustível

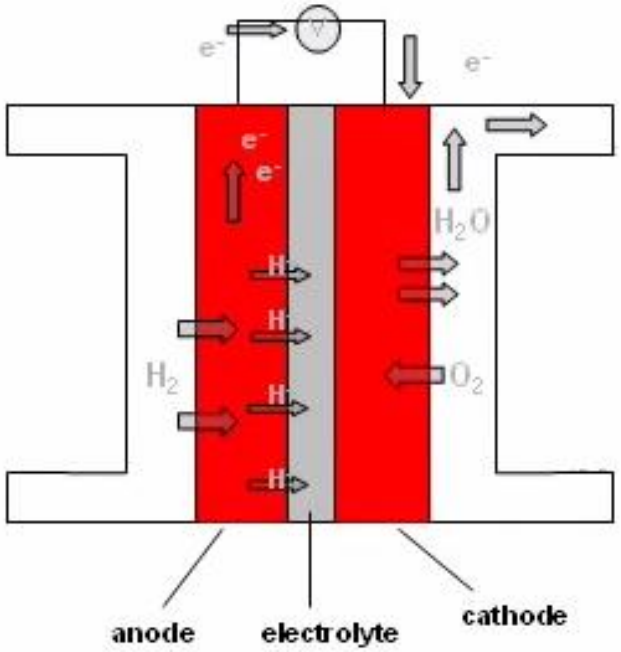
✓ **Desafio catalisador**

➢ Catalisador é uma substância que aumenta a velocidade de reação sem ser consumida na reação. O nome vem de palavras gregas significando "dar início ao se aproximar".

➢ Um catalisador fornece um caminho alternativo, ou seja, uma rota reacional que apresenta uma menor energia de ativação .



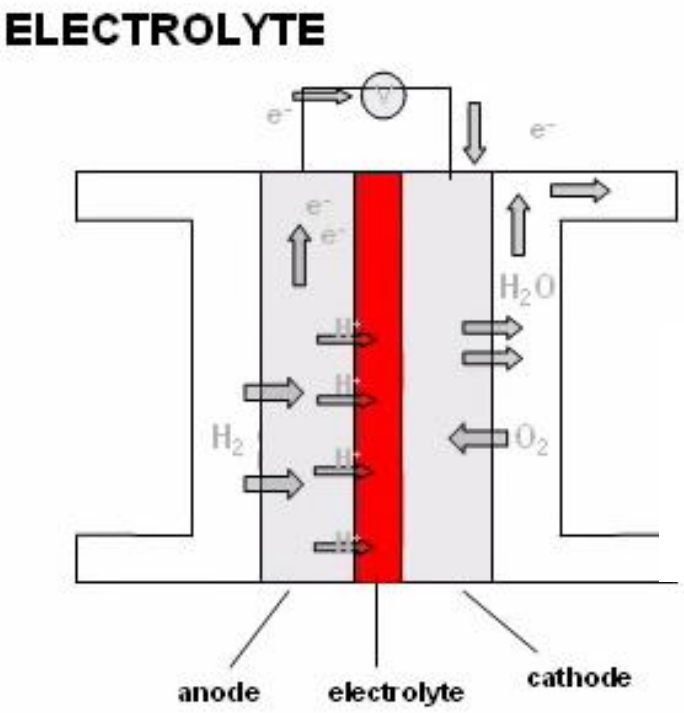
ELECTRODES: ANODE + CATHODE



Eles são responsáveis pelas limitações das CaCs. Devido a presença de catalisadores, componentes são muito sensíveis ao envenenamento.
Eles também são os elementos caros na construção das células a combustível, devido a presença de metais.

Se o anodo e o catodo são idênticos, então a CaC é chamada de BIPOLAR e eles podem trocar as suas funções.

Components of a Fuel Cell

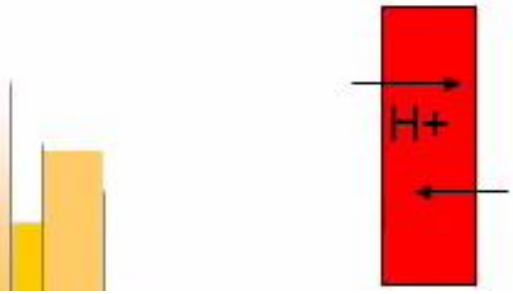


- As membranas devem estar hidratadas convenientemente.
- Os problemas de evaporação precisar estar equacionados (trata-se do mecanismo da gestão de água na célula)
- PEMFC trabalha em baixas temperaturas

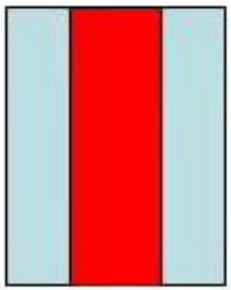
O Eletrólito é o componente central da Célula

Principais funções:

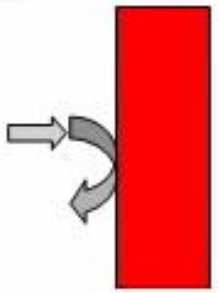
Transporte de íons para balancear as cargas no circuito



Separa o Catodo e o Anodo

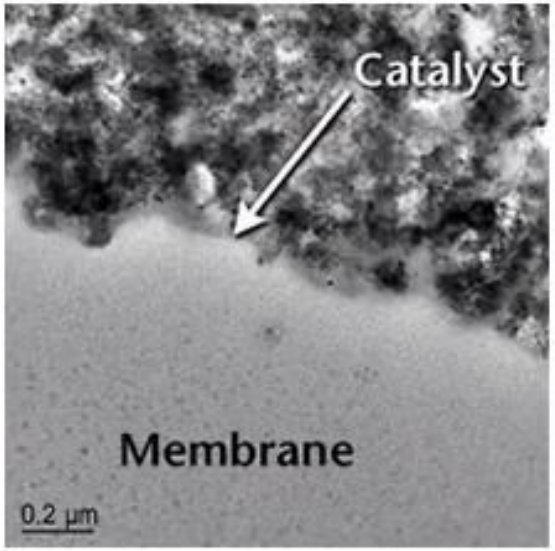


Evita a mistura entre o oxigênio e o combustível

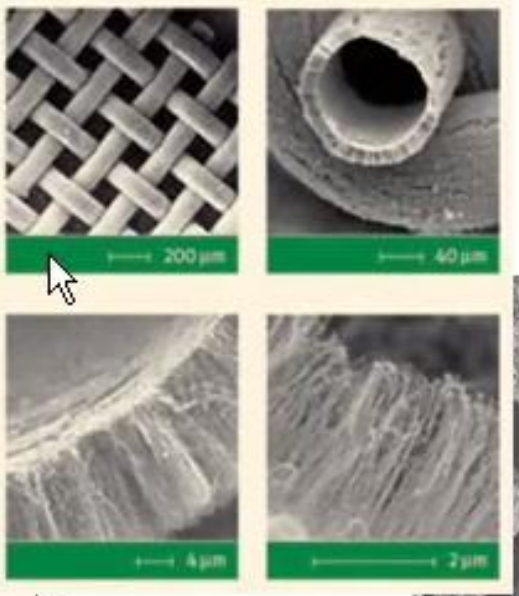


MEA

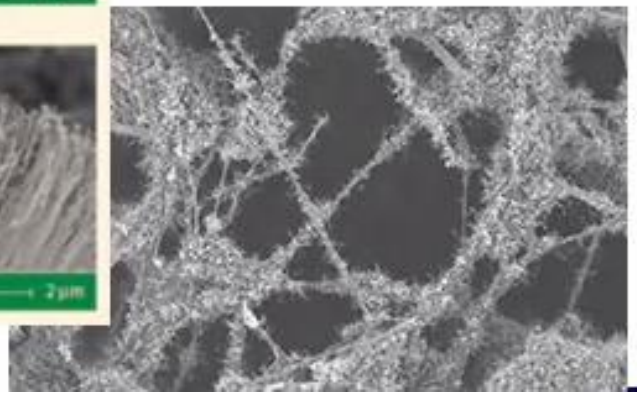
The catalysts consist of porous materials and Pt particles cast on the membranes surfaces



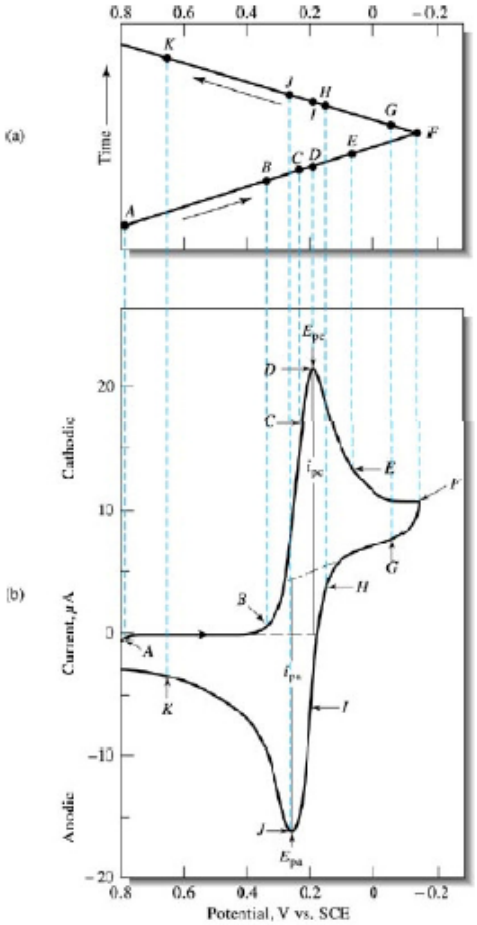
Carbon cloth is used to have high electronic conductivity



Carbon fibre substrates are used for their high conductivity



Voltamograma cíclico



© 2004 Thomson - Brooks/Cole

$$Fe(CN)_6^{3-} + e^- \rightleftharpoons Fe(CN)_6^{4-}$$

A: início da curva de potencial vs corrente

B: início da redução (corrente catódica)

B-C: aumento rápido na corrente

C-D: aumento mais lento na corrente devida à diminuição da concentração superficial.

D-F: queda na concentração superficial.

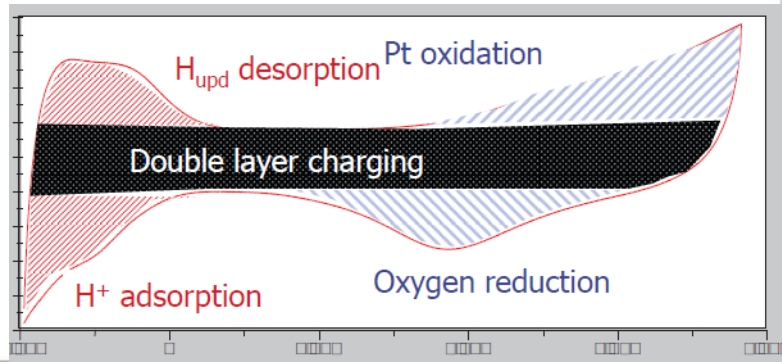
F: direção de varredura é trocada

F-H: corrente continua catódica, pois os potenciais ainda são negativos o suficiente para promover a redução.

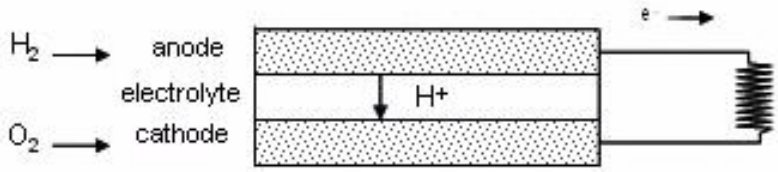
I: potencial positivo para impedir a redução, a corrente vai a zero e torna-se anódica

J: corrente anódica máxima

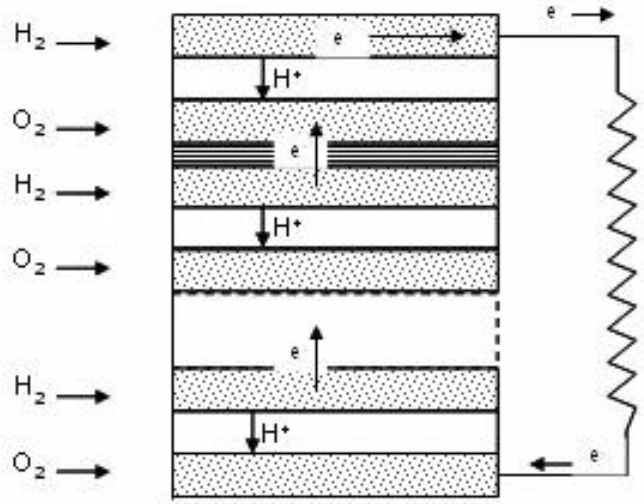
J-K: queda na concentração superficial



OTHER COMPONENTS



Célula Individual



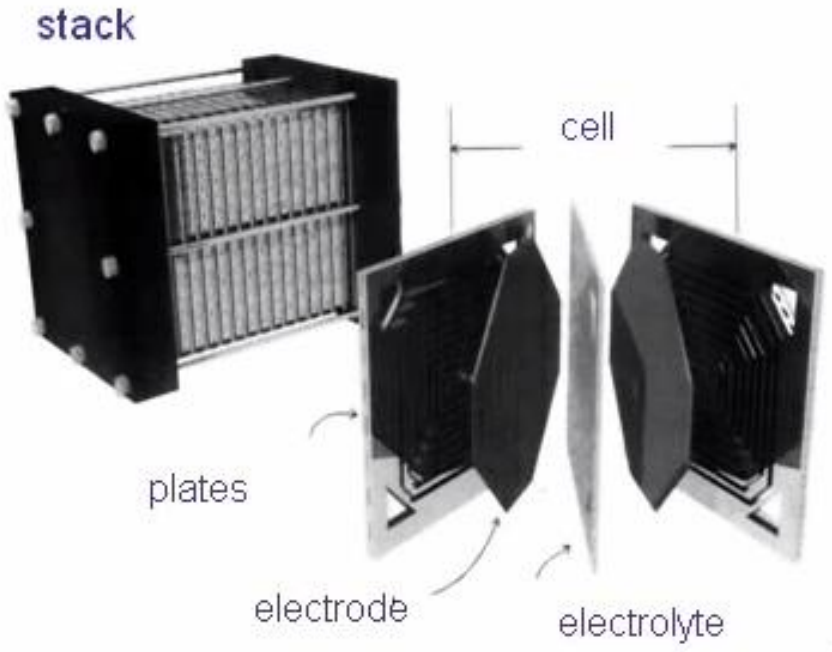
O valor de tensão de uma célula é muito BAIXO. Não maioria das aplicações é feito o empilhamento, a associação de células individuais (em série ou paralelo), de forma a elevar a potência elétrica.

A geometria das associações podem variar dependendo dos componentes e da aplicação

The electrical power is increased by the increase on the voltage or current density: $P = I \cdot U$

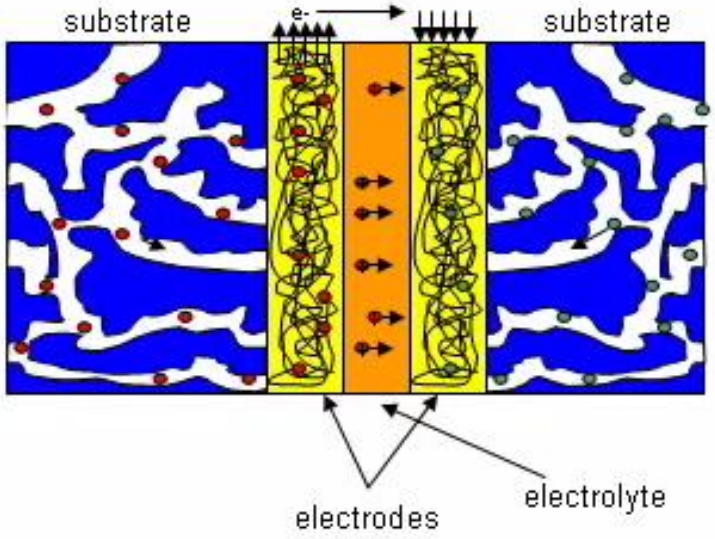
FUNCTIONALITY OF FUEL CELLS

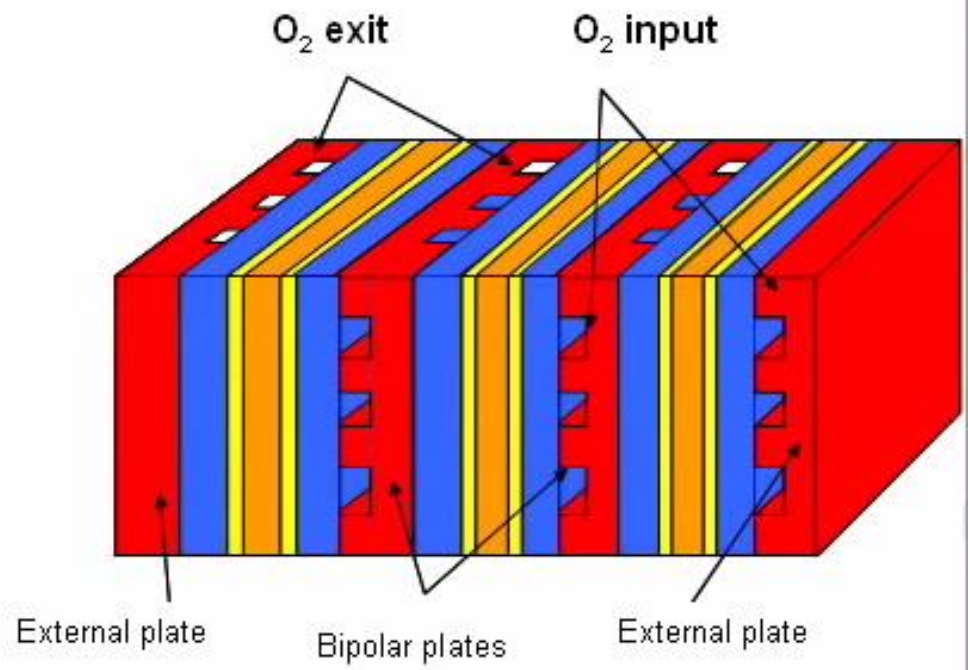
De forma a prover uma forma compacta, são utilizadas as placas bipolares e a placas de fechamento da células



- **Esses elementos possuem as seguintes funções:**
  - **Estabelecer o contato elétrico entre as células e distribuir a corrente**
  - **Separar a entrada e a saída das diferentes células**
  - **Possibilitar o resfriamento do sistema**

OTHER COMPONENTS



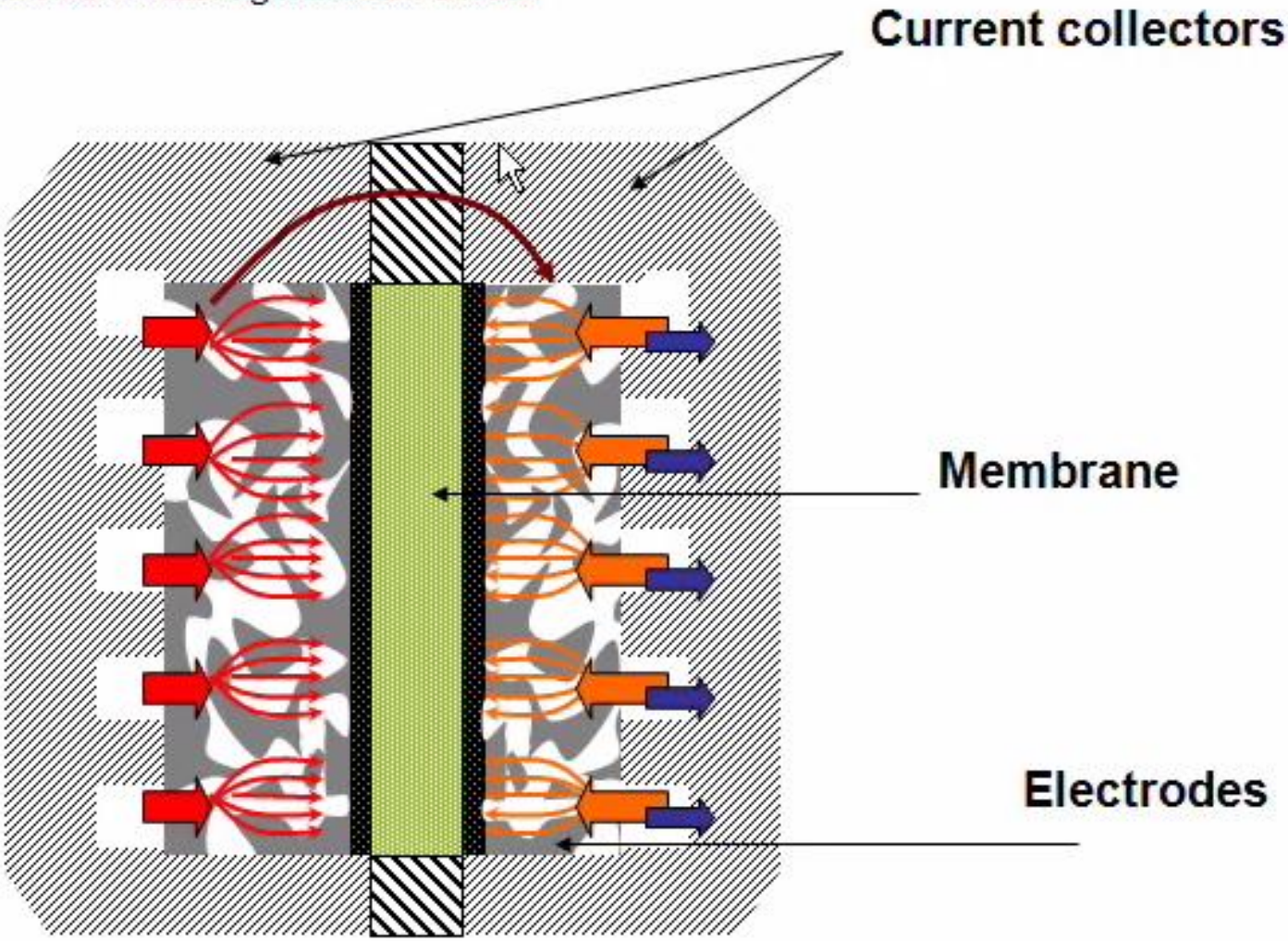


Adicionalmente se faz necessário considerar:

- **Estrutura própria para a distribuição dos gases**
- **Resfriamento e aquecimento do sistema**
- **Coletores de corrente nos eletrodos**
- **Reposição do eletrólito**

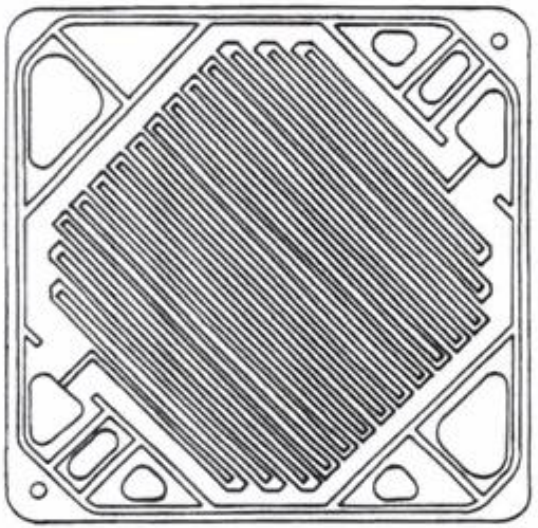
Seccion of the Cell

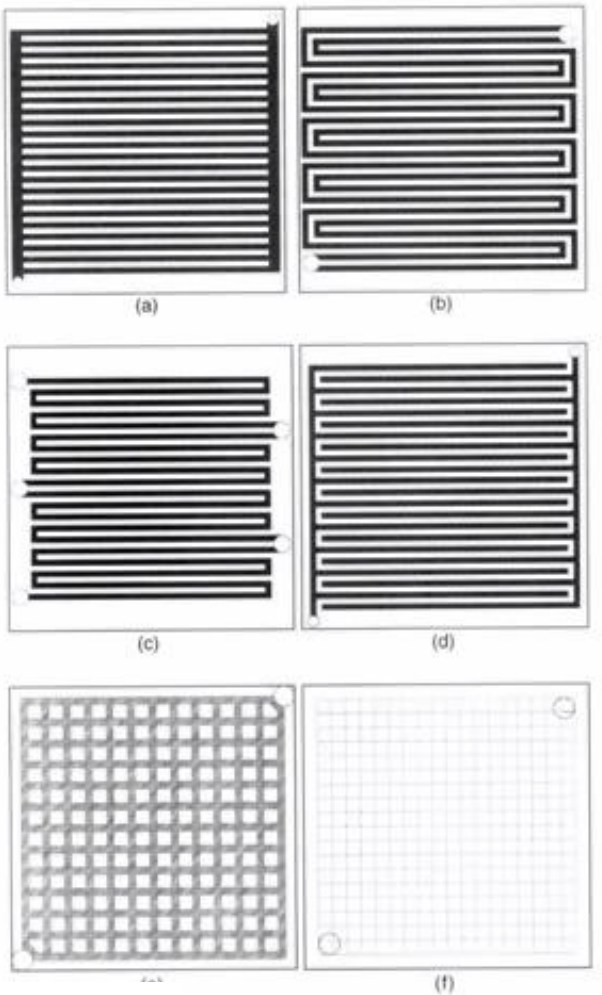
The gas is diffused through the electrodes



Current collectors

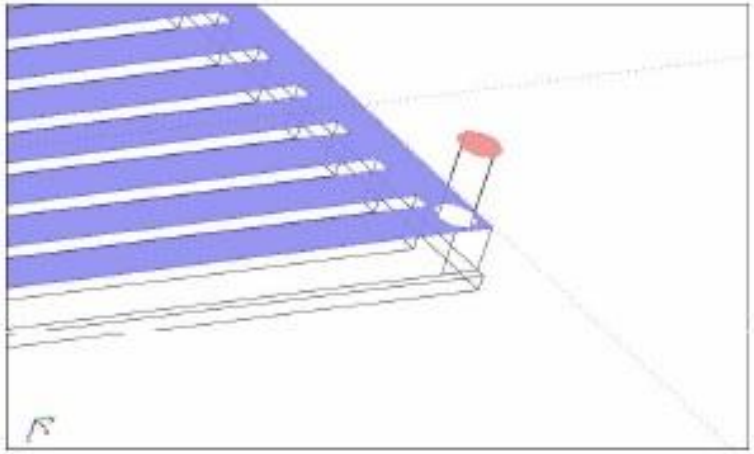
Several possible configurations

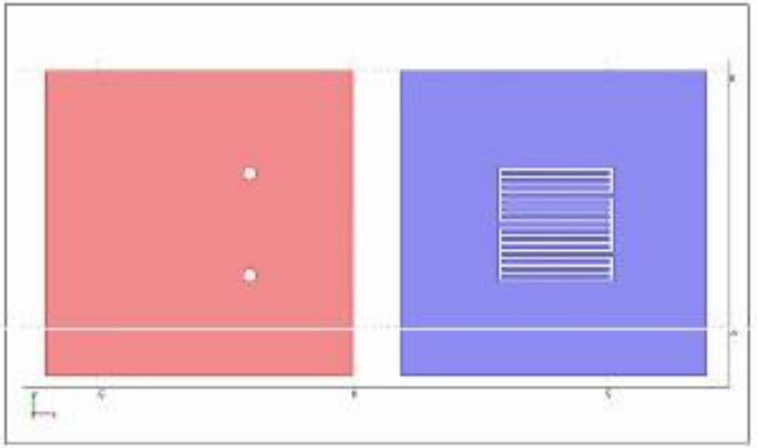


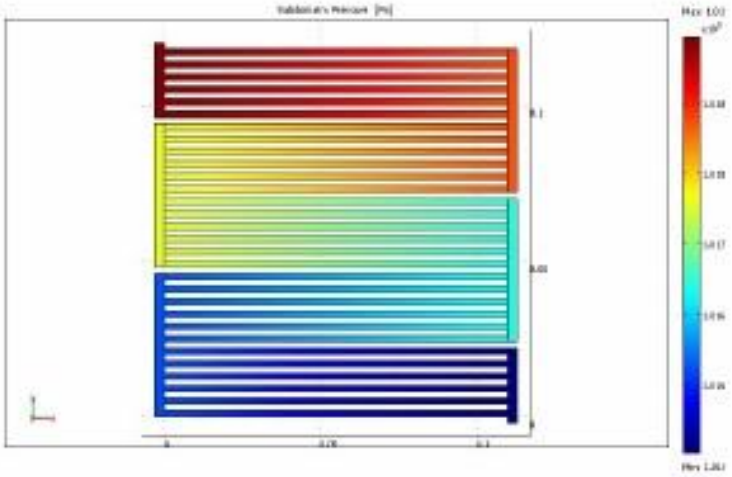


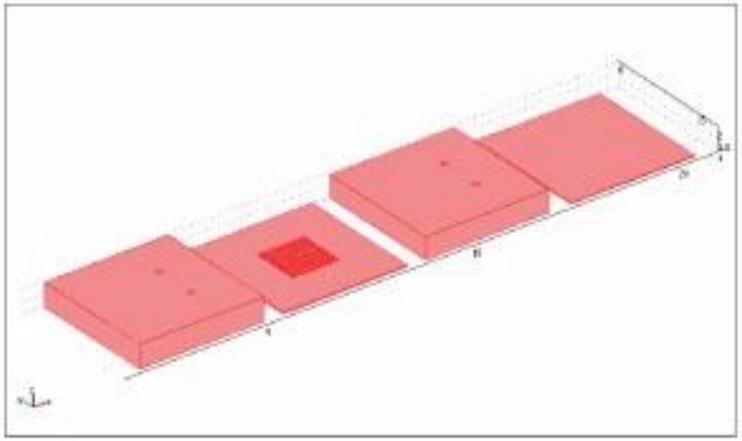
- **Para fornecer o fluxo necessário de hidrogênio e oxigênio**
- **Fluxo de gases compacto**
- **Baixas perdas Ôhmica**
- **MEA compacto**
- **Controle de temperatura**
- **Gerenciamento de água**

• Modelagem e Simulação de Placas Bipolares



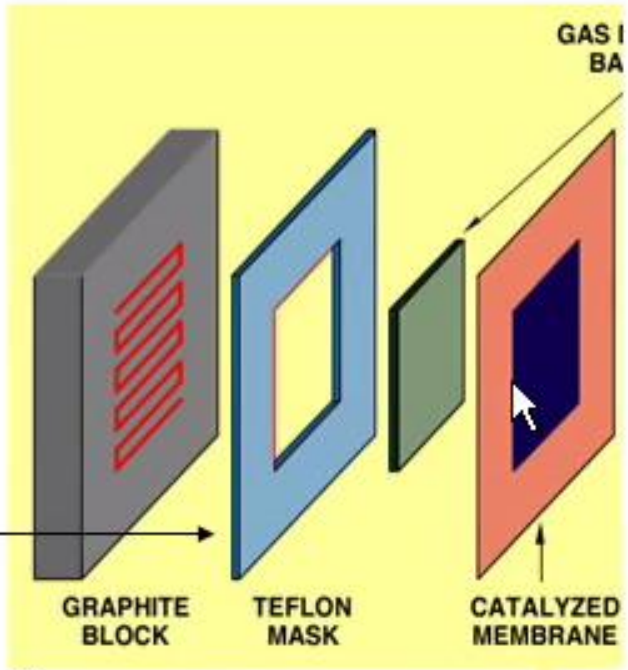






Seccion of the Cell

Different layers to configure the MEA



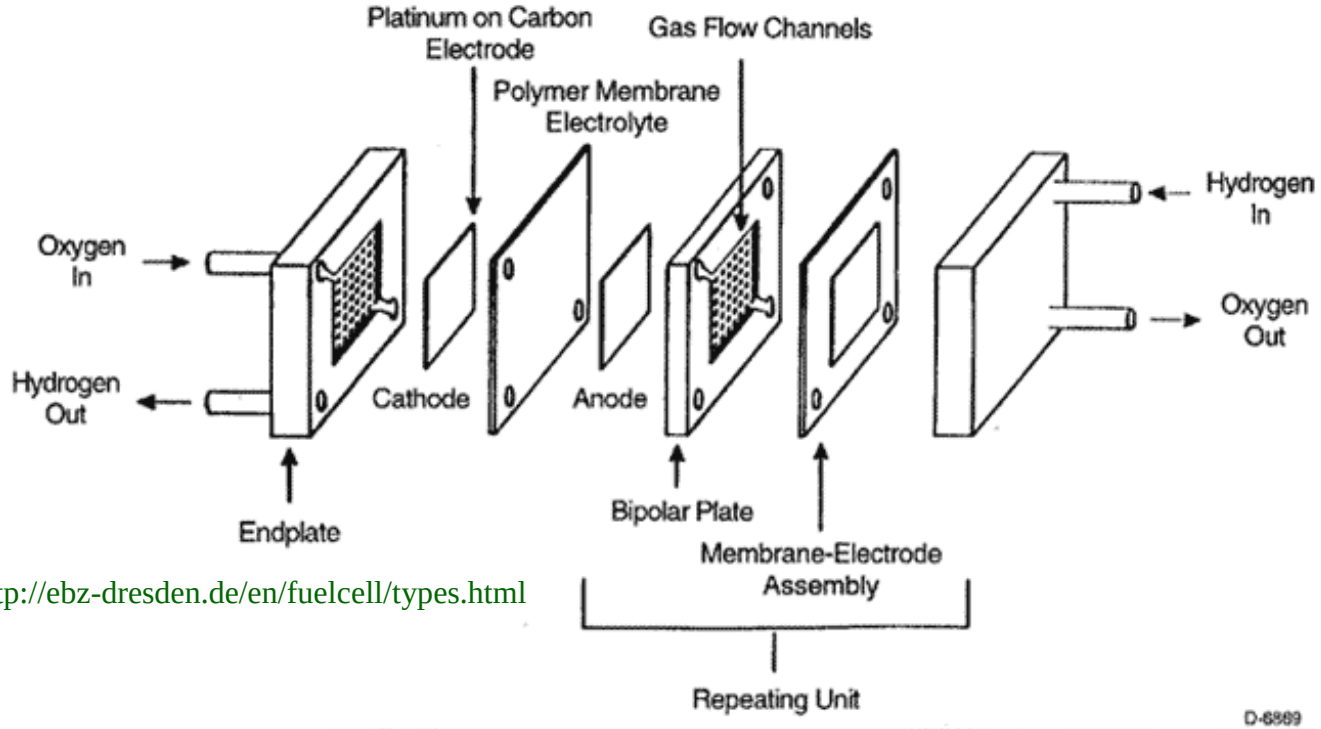
Camadas de Teflon são adicionadas para contribuir no controle de água na membrana

The aim is to reduce catalyst charge (0.80 – 0.25 mgPt/cm²)

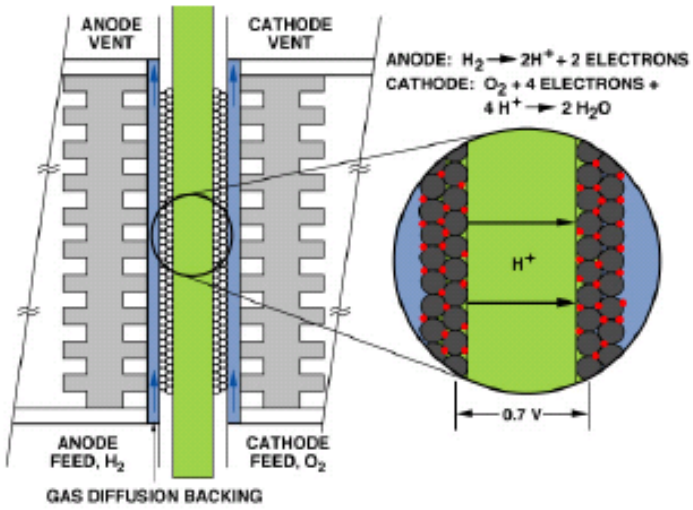
- Reducing cost
- No decrease on the current density

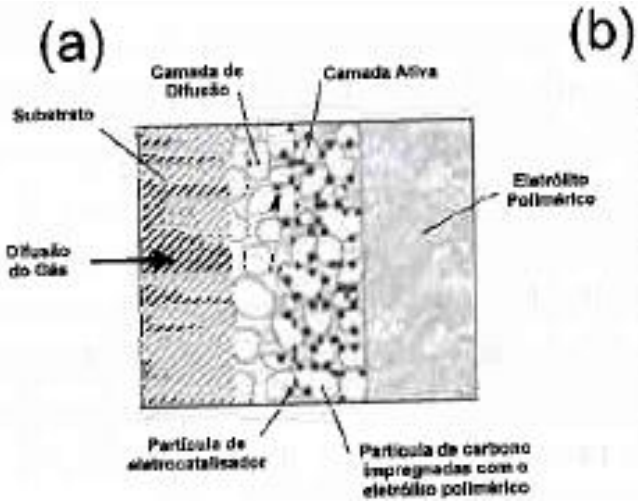
Highly charged 15 – 20 mg/cm² → 10 mm
600 mA/cm² with a voltage of 0.7 V

Aspectos Construtivo



http://ebz-dresden.de/en/fuelcell/types.html



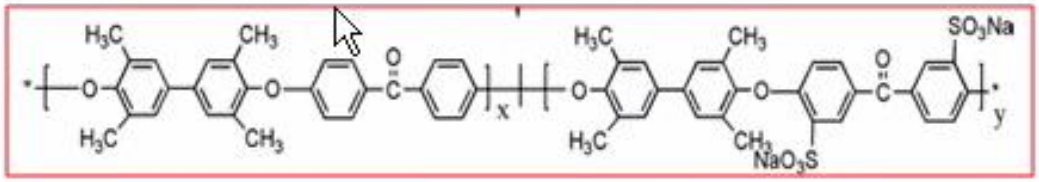


Fonte: E. T. Serra, Células a Combustível

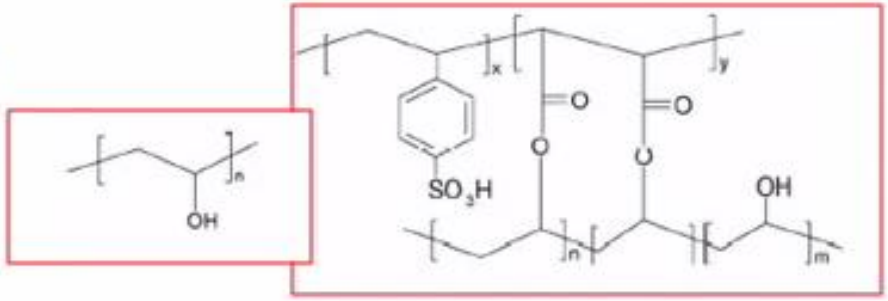
Electrolyte:

Electrolytes consist of cationic exchange polymer membranes

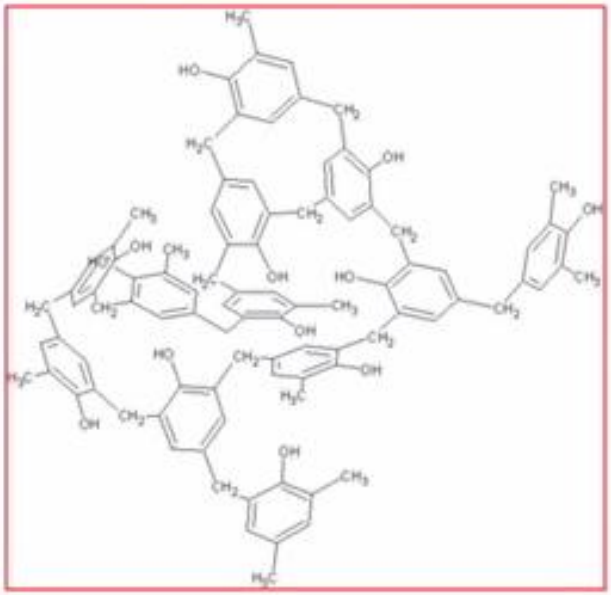
SPEEK



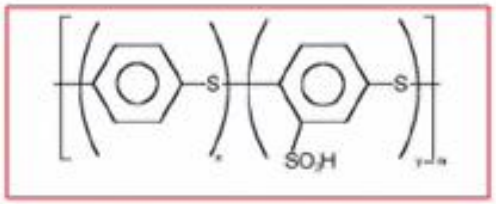
PVA

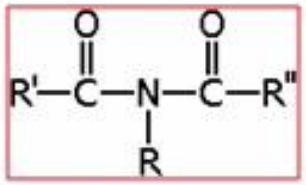


Phenol-Formaldehyde



Pheninels

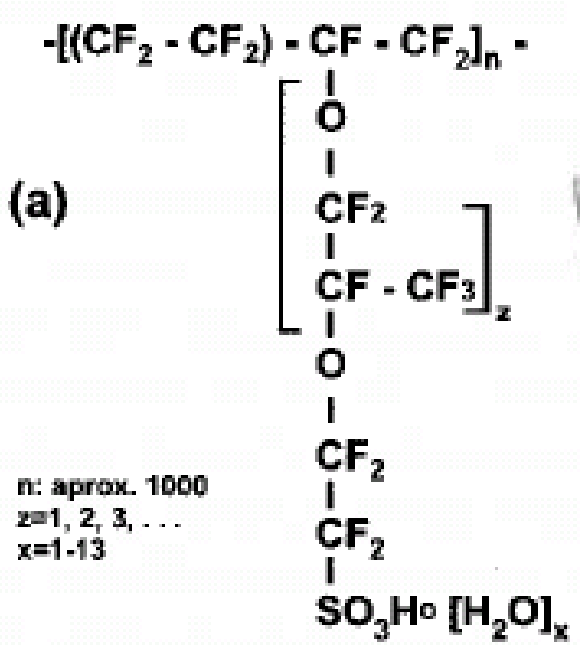


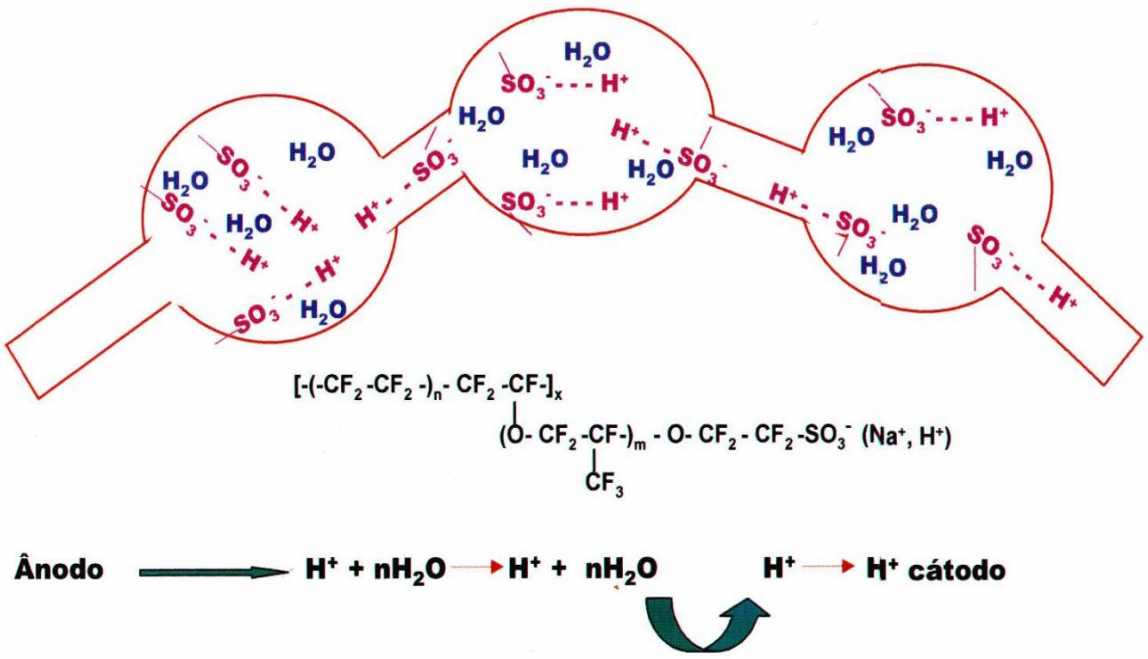


Polyimides

Aspectos Teóricos: Nafion

Nafion é um fluoropolímero-copolímero baseado em tetrafluoroetileno sulfonado desco berto no final dos anos 1960 por Walther Grot de DuPont.





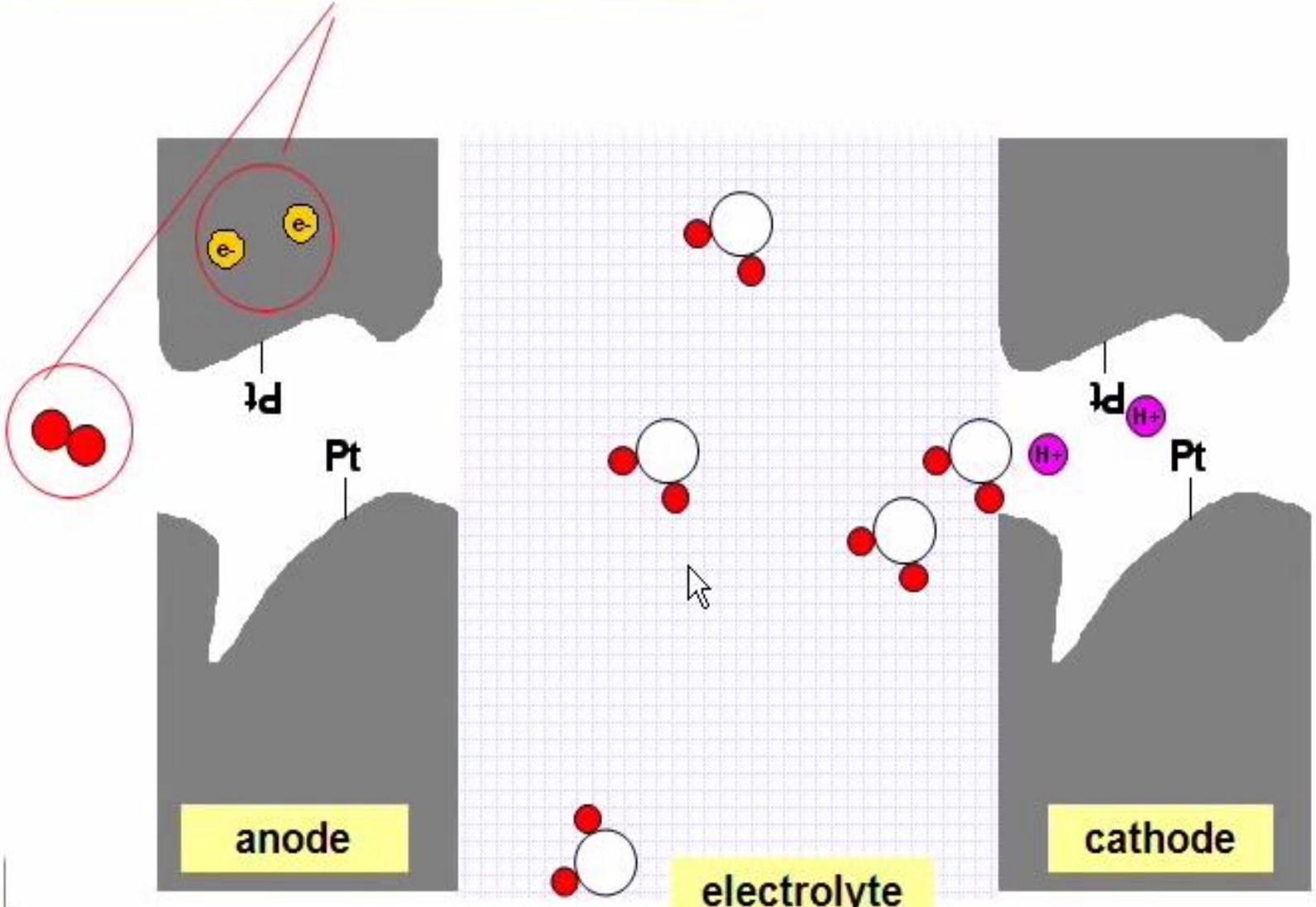
Migração de prótons (e água) em bolhas, através de poros interconectados em uma membrana Nafion® solvatada com água.

Fonte: E. T. Serra, Células a Combustível

Fonte: Franco, E. G (2009)

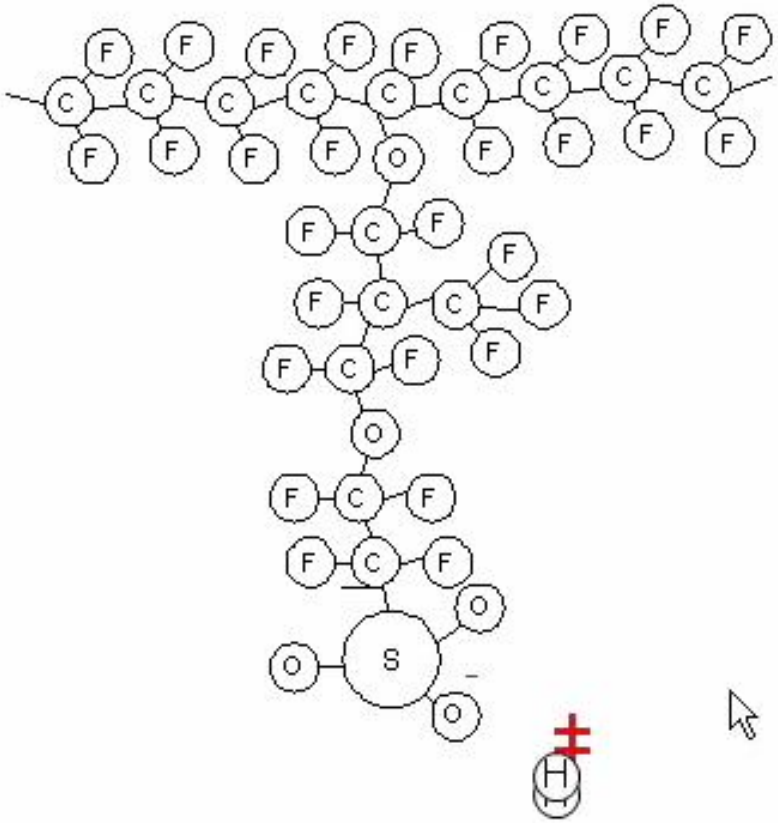
- **Existem muitos tipos de membranas que podem ser utilizadas como eletrólito em PEMFC.**
- **As principais características de uma membrana para célula PEM:**
  - **Alta condutividade de protóns**
  - **Alto conteúdo de água**
  - **Impermeabilidade a gases**
- **São vários e diferentes os mecanismos de difusão através da membrana polimérica que determinam a operação da FC, incluindo:**
  - **Pontes de Hidrogênio**
  - **Mecanismo Veicular**

Transport mechanism in the electrolyte



Transport mechanism

Ionic Exchange Membranes: Nafion



ánodo

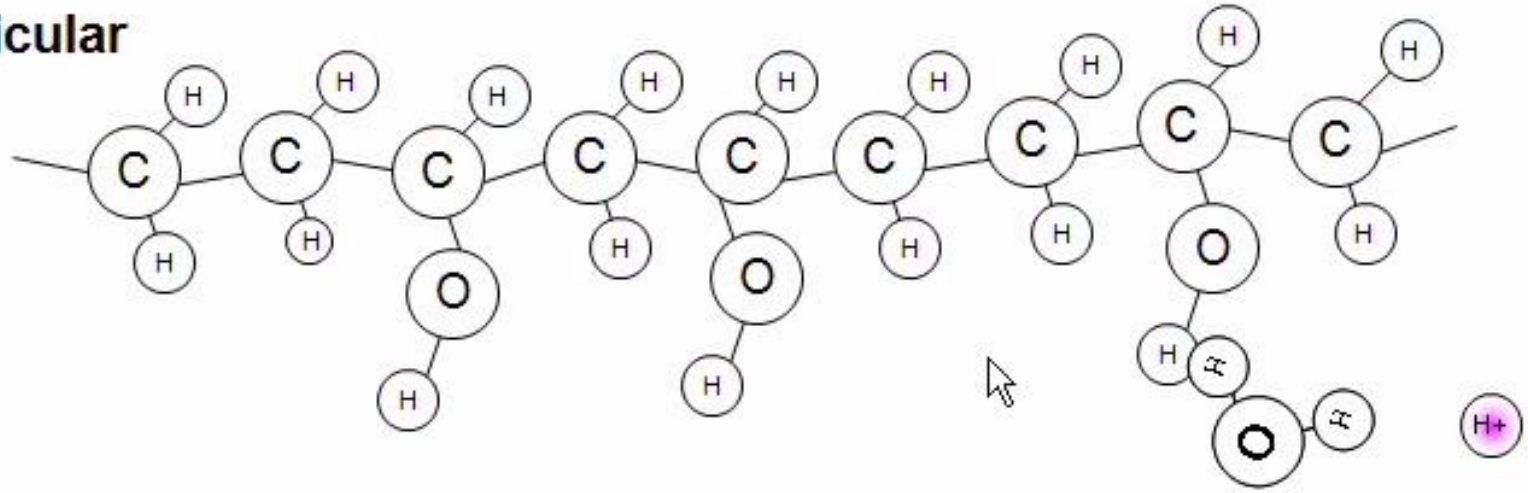
cátodo

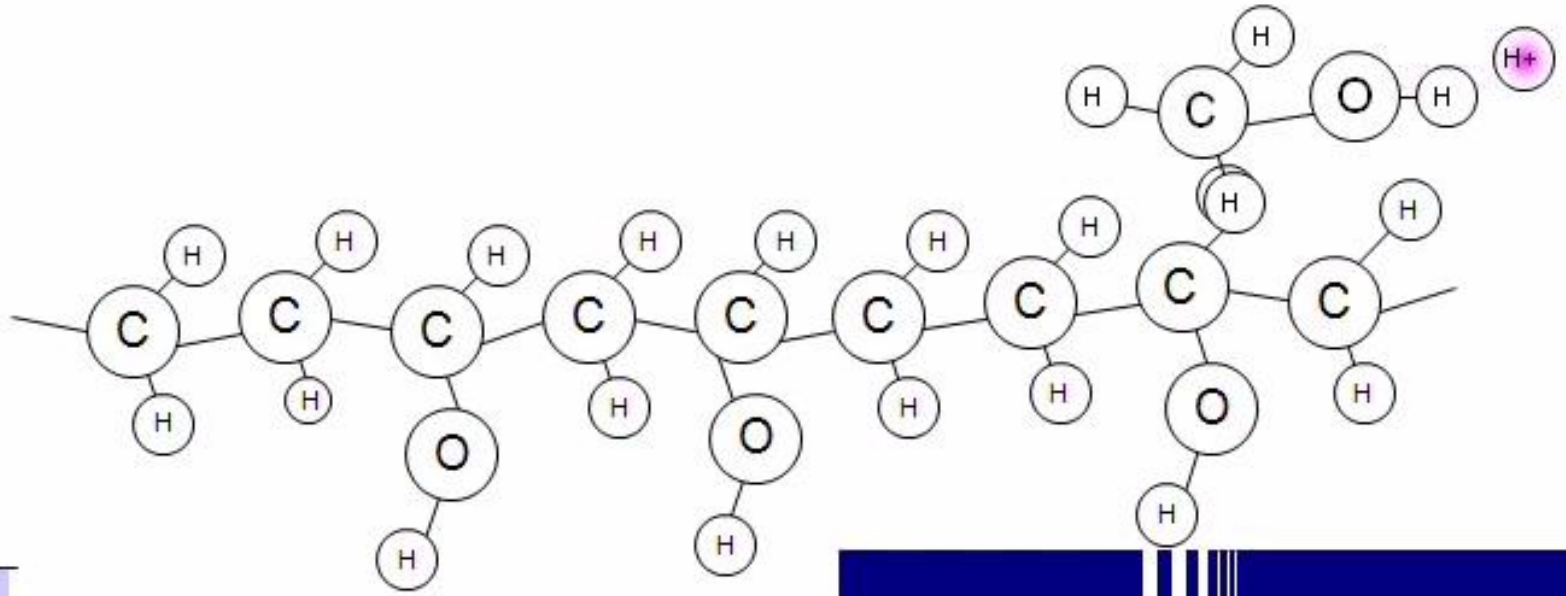
Transport mechanisms

- Cationionic exchange (Donan's equilibrium)
- Hydrogen bonds (Grotthhuss)
- Vehicular mechanisms (H_3O^+, $CH_3OH_2^+$, $H_5O_2^+$, $H_7O_3^+$)

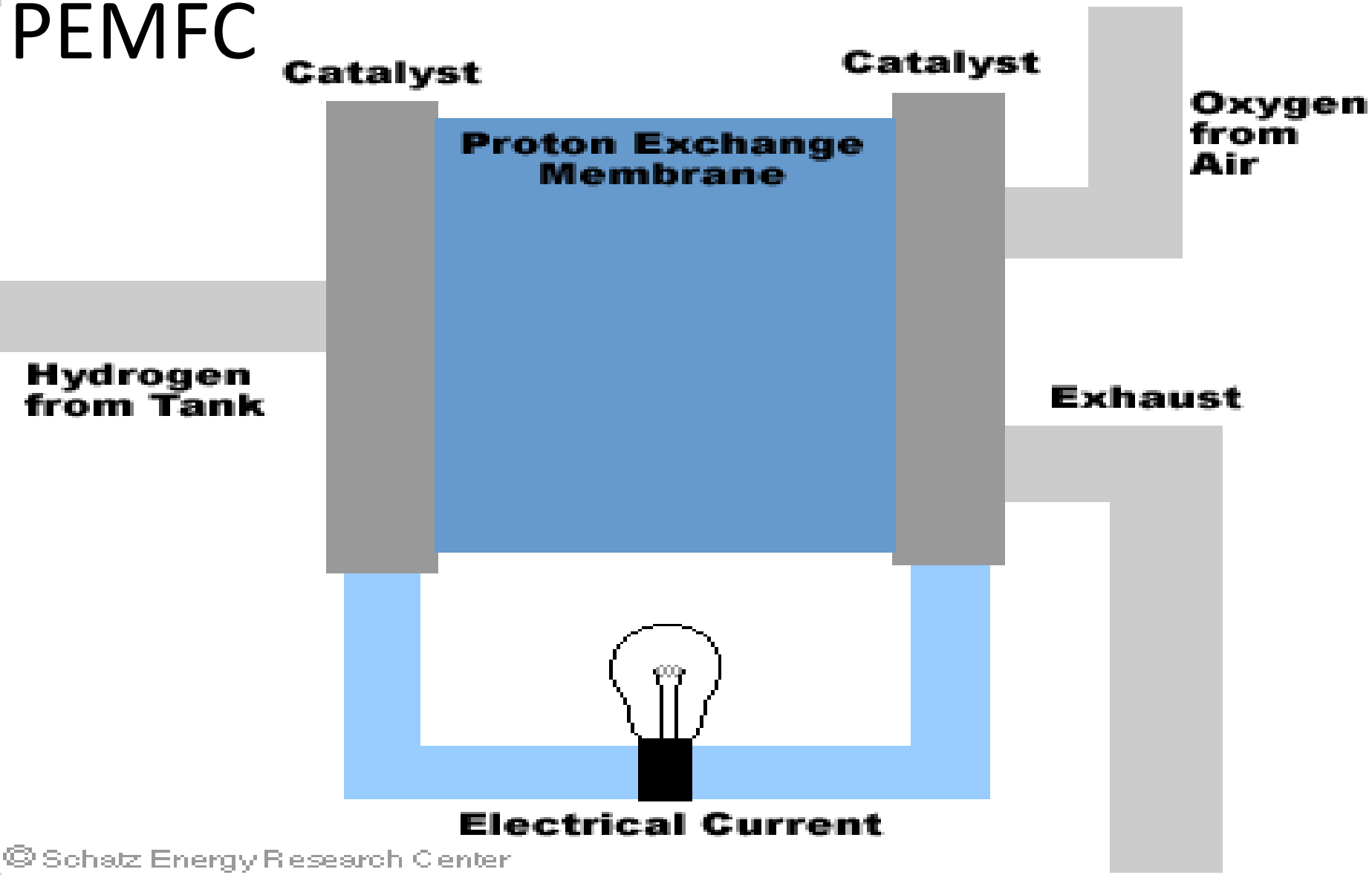
Vehicular mechanism

Vehicular

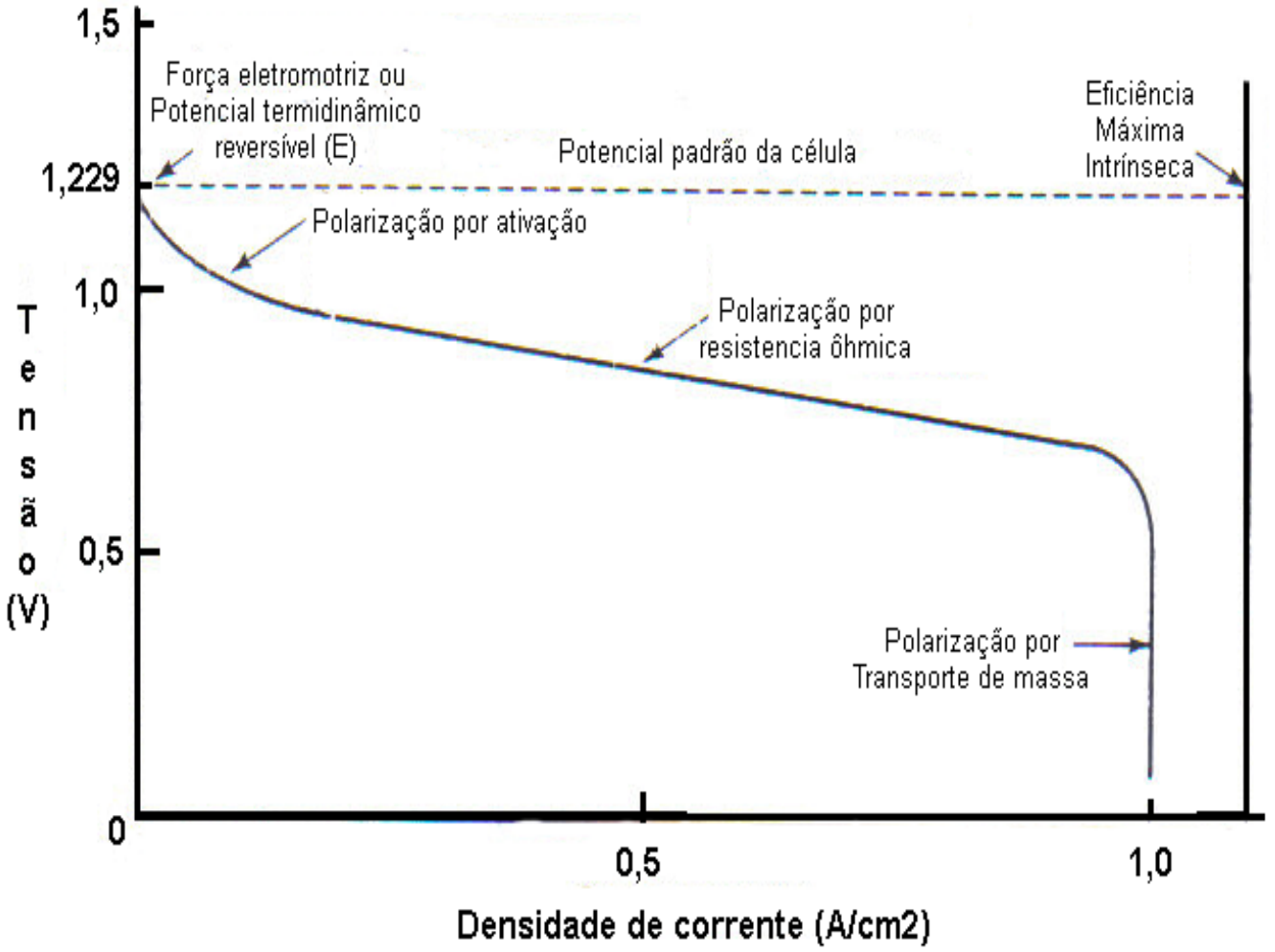




PEMFC

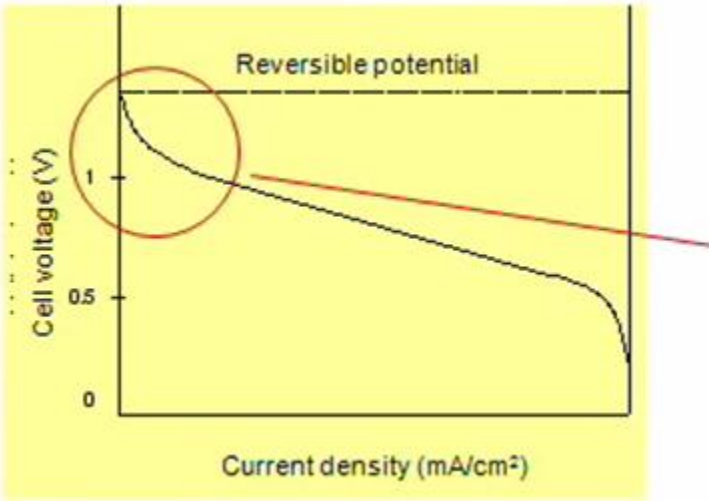

Catalyst
Catalyst
Oxygen from Air
Proton Exchange Membrane
Hydrogen from Tank
Exhaust
Electrical Current
© Schatz Energy Research Center

Curva de Polarização

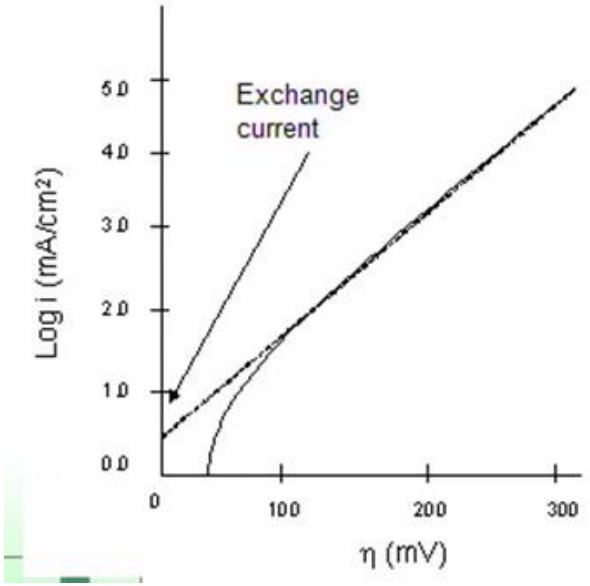


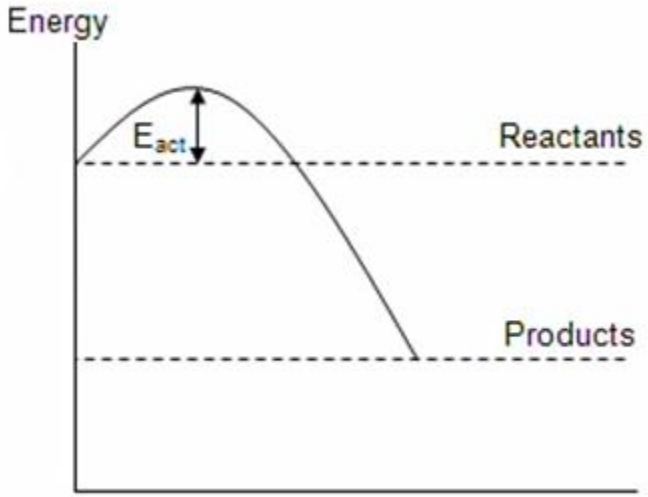
Fonte: Franco, E. G (2009) adaptado de Fuel Cell Handbook – sixth edition

Polarização de ativação



Baixa i0





Eq. Taffel

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0}$$

By plotting $\eta_{act} = a + b \log i$

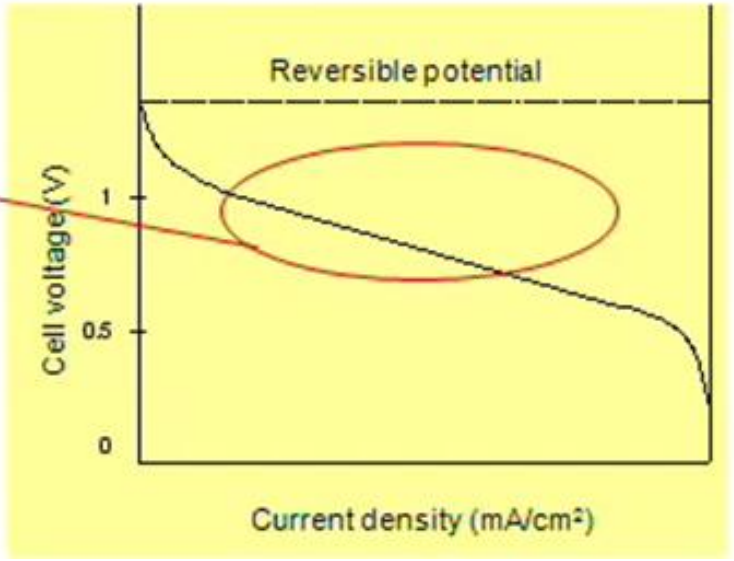
SLOPE → $b = 2.3 \frac{RT}{\alpha n F}$

ORDINATE IN ORIGIN → $a = -2.3 \frac{RT}{\alpha n F} \log i_0$

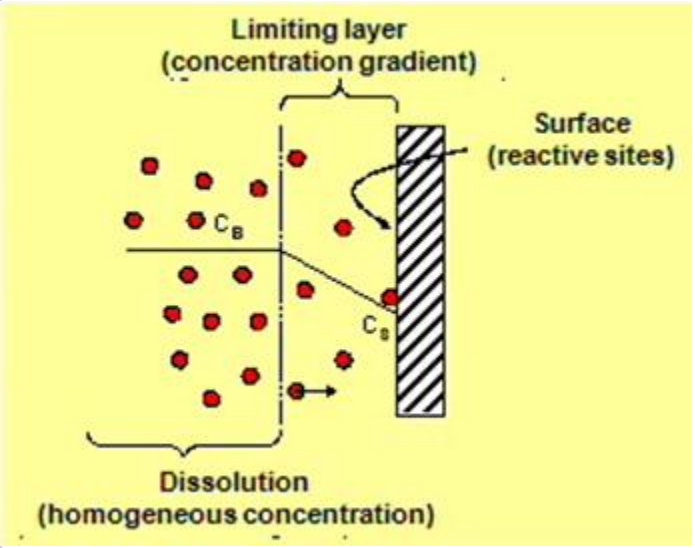
Polarização Ôhmica

Controlled by the Ohm's law

$$\eta_{ohm} = i \cdot R$$



Polarização por Concentração



FICK's equation $$i = \frac{nFD(C_B - C_S)}{\delta}$$

$$i_L = \frac{nFDC_B}{\delta}$$

CONCENTRATION IN THE REACTING SURFACE — C_S

CONCENTRATION IN THE BULK SOLUTION — C_B

$$\frac{C_S}{C_B} = 1 - \frac{i}{i_L}$$

By using the Nemst's Law:

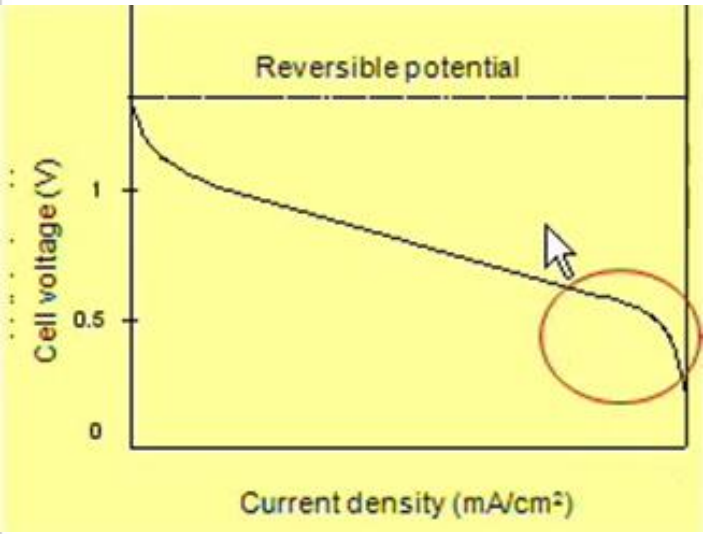
$$E_{i=0} = E^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln C_B$$

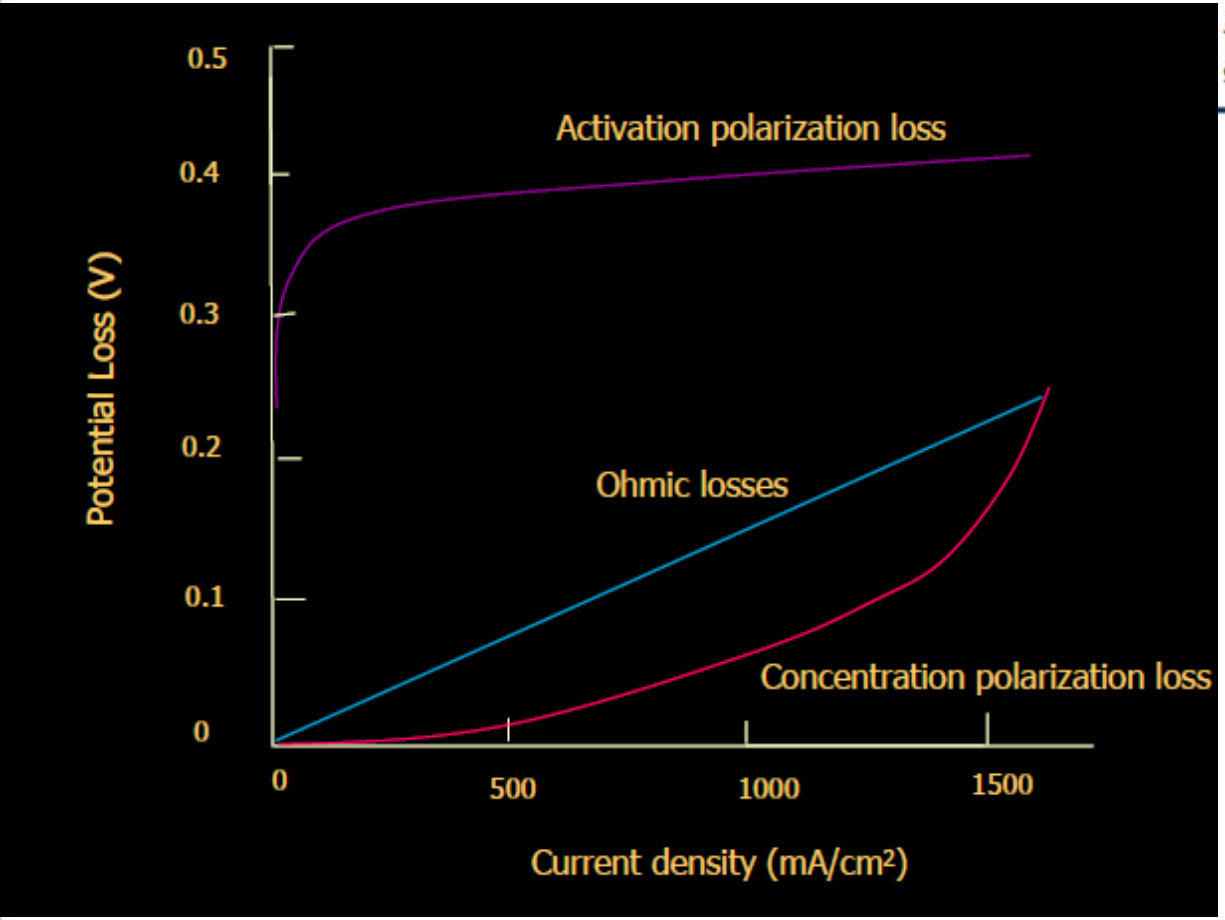
$$E = E^0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln C_S$$

The Overpotential (E^0 - U) can be expressed as:

$$\Delta E = \eta_{conc} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln \frac{C_S}{C_B}$$

$$\eta_{conc} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right)$$





Real Voltage

Concentration polarisation

Ohmnic polarisation

$$U = E_0 - A \cdot \ln\frac{i}{i_0} + B \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) - i \cdot R$$

Reversible cell voltage

Activation polarisation

$$V = E - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{act} - \Delta V_{trans}$$

$$V = E - ir - A\ln\left(\frac{i + i_n}{i_0}\right) + m\exp(ni)$$

$$V = E_{oc} - ir - A\ln(i) + m\exp(ni)$$

E is the reversible OCV given by equations 2.1 and 3.1

i_n is the internal and fuel crossover equivalent current density described in Section 3.5

A is the slope of the Tafel line as described in Section 3.4.2

i_0 is either the exchange current density at the cathode if the cathodic overvoltage is much greater than the anodic or it is a function of both exchange current densities as given in equation 3.5

m and n are the constants in the mass-transfer overvoltage equation 3.10 as discussed in Section 3.7

r is the area-specific resistance, as described in Section 3.6.

Table 3.3 Example constants for equation 3.14

Constant	Ballard Mark V PEMFC at 70°C	High temperature, e.g. SOFC
E_{oc} (V)	1.031	1.01
r (kΩ cm^2)	2.45×10^{-4}	2.0×10^{-3}
A (V)	0.03	0.002
m (V)	2.11×10^{-5}	1.0×10^{-4}
n (cm^2 mA^{-1})	8×10^{-3}	8×10^{-3}

```
Eoc=1.031, A=0.03, r=0.000245, m=2.11E-5, n=0.008
i=linspace(1,1000,200)
v= Eoc - r*i - A*log(i) - m*exp(n*i)

plot (i,v)
```

Real behaviour

Electrical Power depends on two variables:

$P = V \cdot I$

Electrical Potential (E, U, V) Volts

- Thermodynamic variable
- Not extensive

$E = \Delta G / n F$

Energy contained in a system

Intensity / Current (I, i) Amperes

- Charge conducting variable
- Extensive

$I = n \cdot F \cdot A \cdot j$

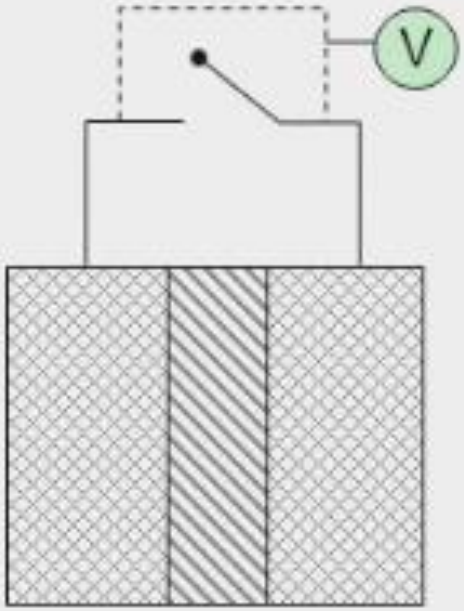
Amount of fuel consumed

Real behaviour

Voltage and current are related

$$P = U \cdot I$$

Open circuit:

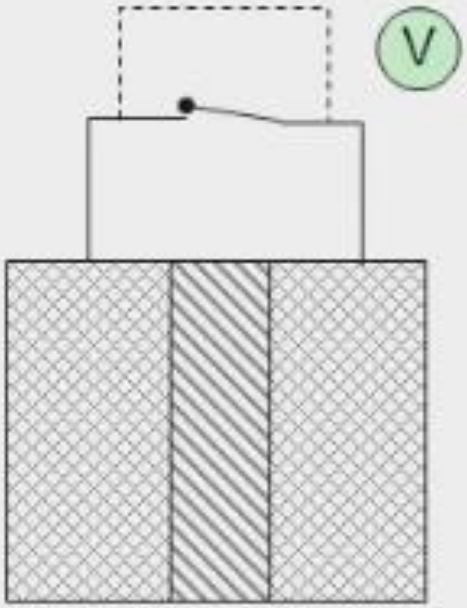


$i = 0\ A$

$U = E^0\ V$

Maxim efficiency → η_{rev}

Closed circuit:



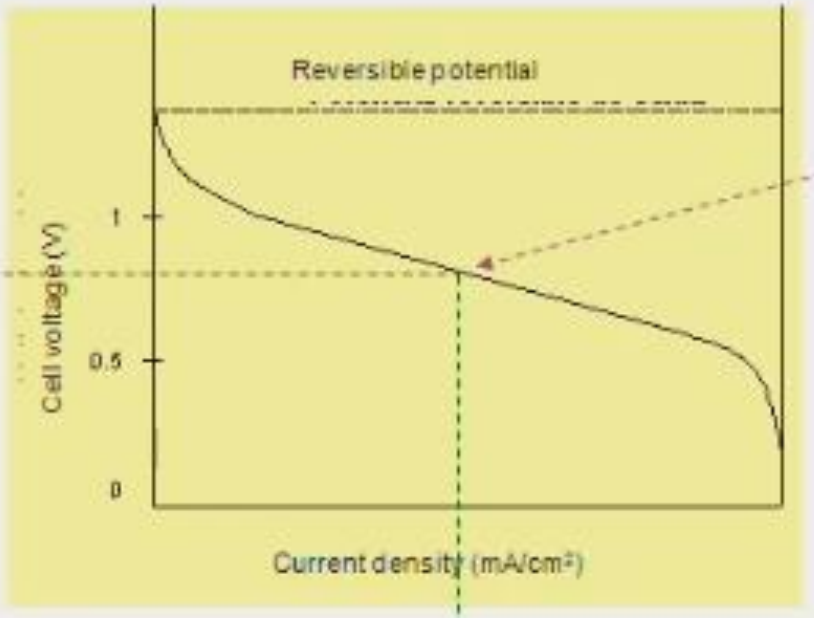
$i > 0\ A$

$U < E^0\ V$

Reduction in efficiency → $\eta < \eta_{rev}$

Voltage and current are related

- The position on the polarisation curve defines the real behaviour of the Fuel Cell



U (Volts)

Working conditions (I, U)

Net electrical Power **P = I·U**

I (Amperes)

Real behaviour

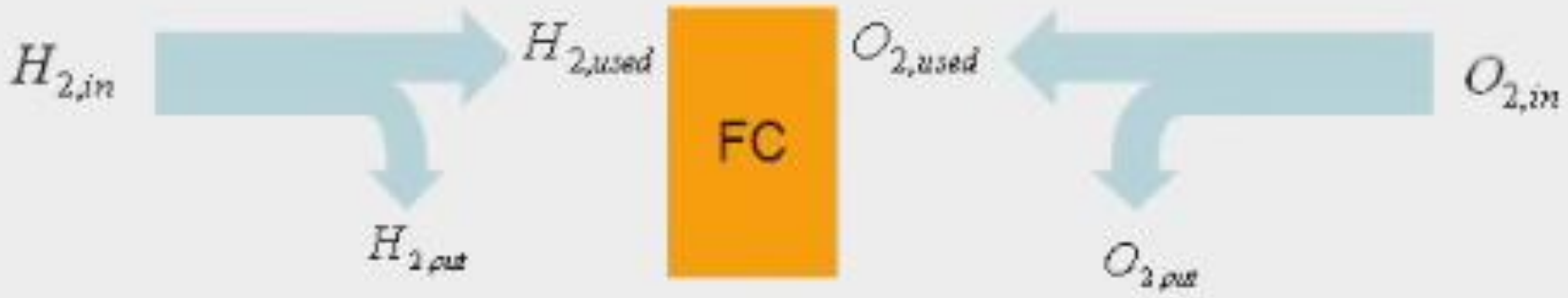
Use of reactants U_f, U_{ox}

Fraction of Fuel or Oxidant introduced into the Cell which reacts electrochemically

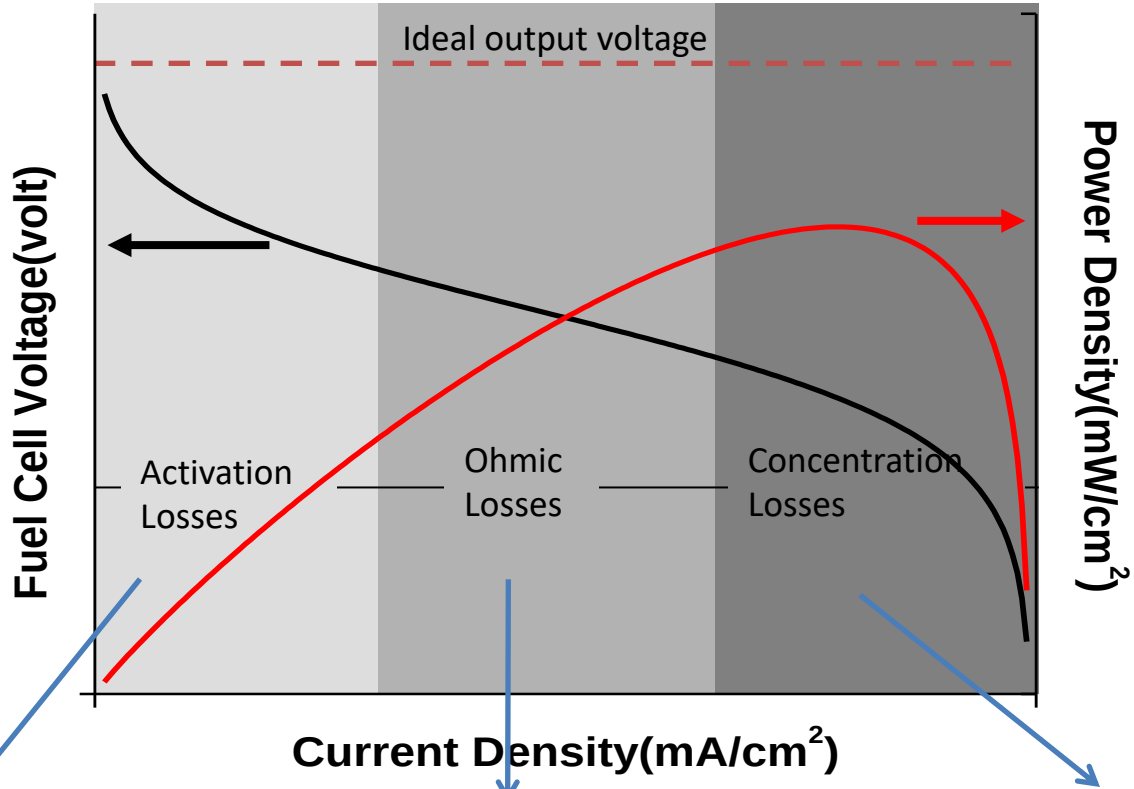
For a Hydrogen Fuel Cell

$$U_f = \frac{H_{2,in} - H_{2,out}}{H_{2,in}} = \frac{H_{2,used}}{H_{2,in}}$$

$$U_{ox} = \frac{O_{2,in} - O_{2,out}}{O_{2,in}} = \frac{O_{2,used}}{O_{2,in}}$$



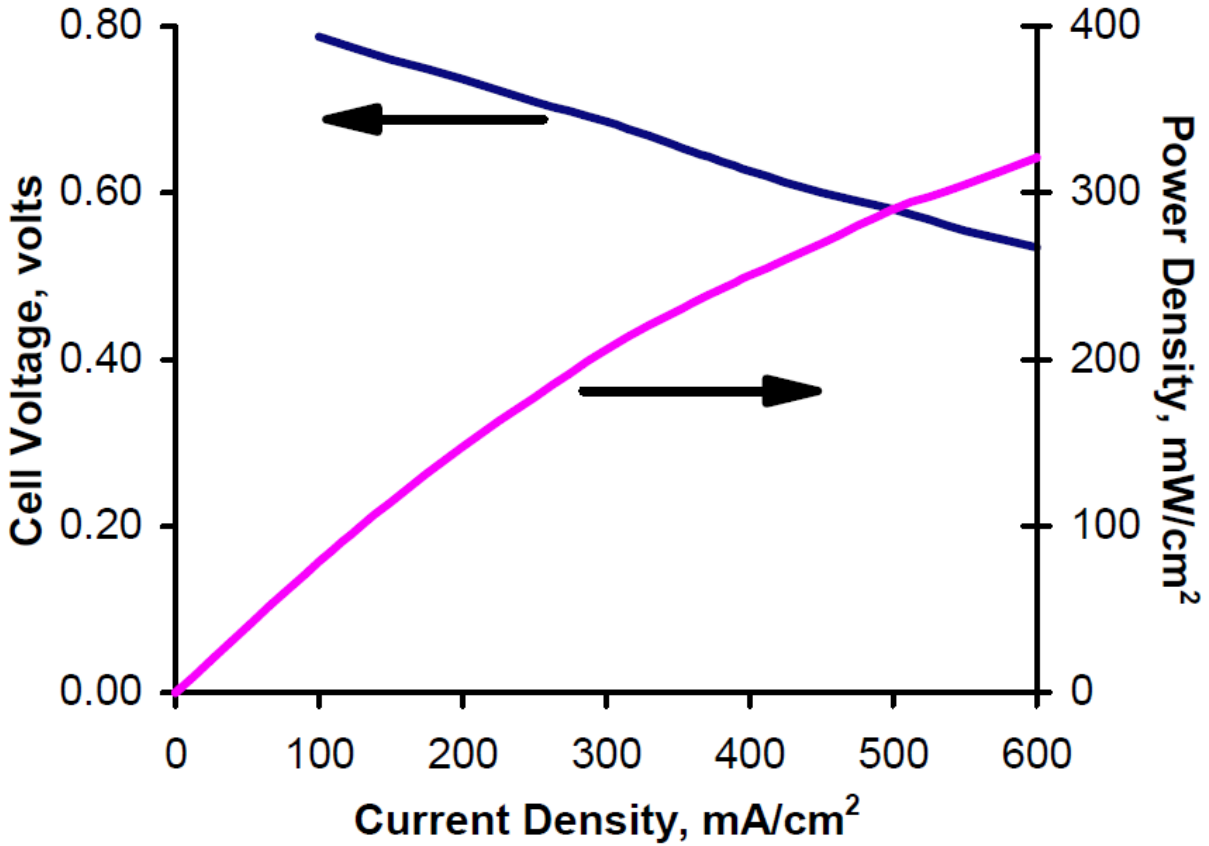
The losses in voltage from the ideal output voltage are referred to as ‘‘polarizations’’



Energy losses associated with the electrode reactions
(Surface reaction kinetics)

Energy losses from electronic impedances (electrodes, contacts, and current collectors) and ionic impedances (from electrolyte)

Energy losses associated with mass transport limitations (reactants and/or products


0.80
0.60
0.40
0.20
0.00
Cell Voltage, volts
400
300
200
100
0
Power Density, mW/cm²
0
100
200
300
400
500
600
Current Density, mA/cm²

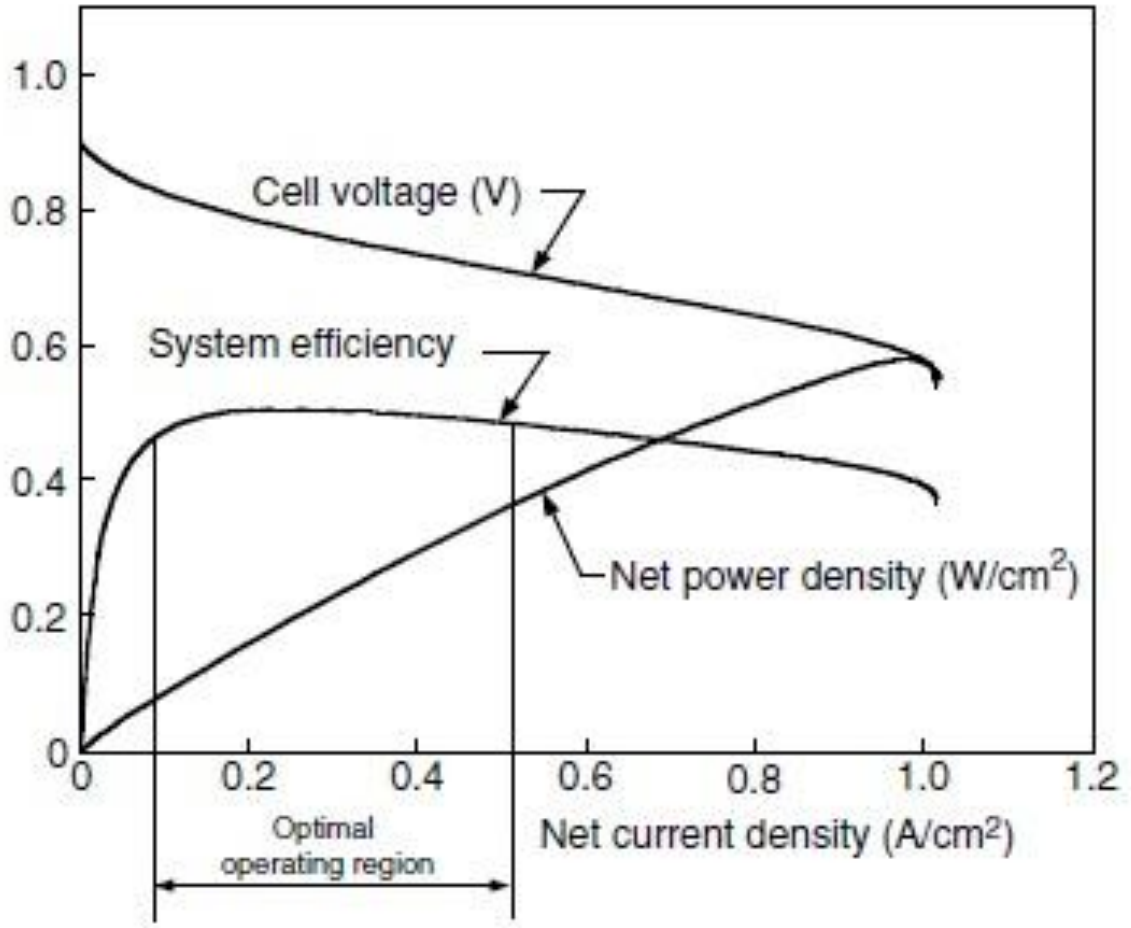
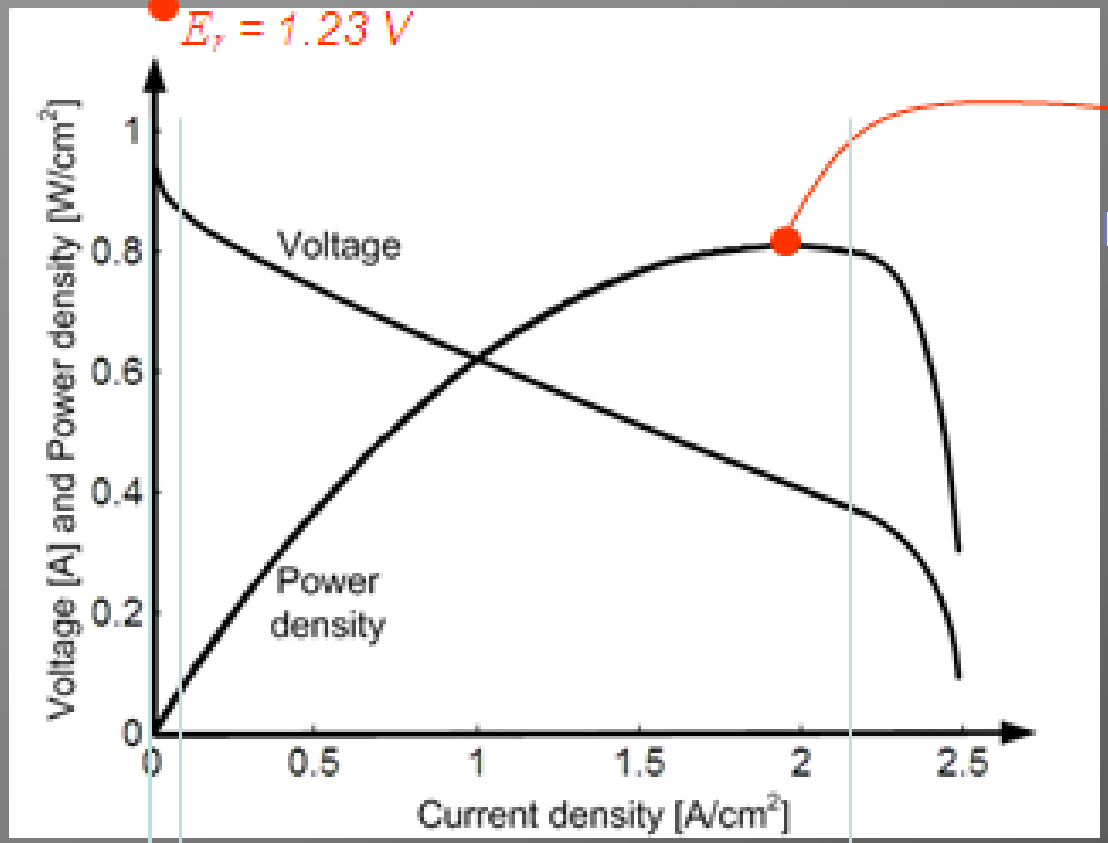


FIGURE 13.1
Typical operating characteristics of a fuel cell system



Maximum power operating point

$E_r = 1.23V$
$b = 60mV,$
$i_0 = 10^{-6.7} Acm^{-2}$
$r = 0.2\Omega cm^2$

Activation loss region

Ohmic loss region (linear voltage to current relationship)

Mass transport loss region

Considerações- Tópico 5

Discussão Final

Percepções
Avaliação individual
Balanço entre a expectativa e o final do Curso
Comentários finais

Referências

•Rifkin, J. A Economia do Hidrogênio . M Books. 2003
• Neto, E. H. G. Hidrogênio Evoluir sem Poluir. BrasilH2. 2005.
•Serra, E. T. ; Furtado, J. G. M. ; Soares, G. F. W. ; Codeceira Neto, A. . Células a Combustível - Uma Alternativa para Geração de Energia e sua Inserção no Mercado Brasiliero. 1a.. ed. Rio de Janeiro: CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2005. v. 1. 186p .
•Linardi, M. Introdução à Ciência e Tecnologia de Células a Combustível. 1. ed. São Paulo: Artliber, 2010. v. 1. 152p .

•J. Larminie e A. Dicks. Fuel cell systems explained. Nova Iorque: Wiley, 2000.
•Barbir, F. PEM Fuel Cells: Theory and Practice. Elsevier. 2005
•ECG. Fuel Cell Handbook. 7ª Edição.

Roteiro de questões prévias

Quais os dois grandes direcionadores para a busca de energia renovável?
Quais as ferramentas de planejamento para a inserção de energia renovável?
Quais são as possíveis ações para a redução da emissão de CO_2?
Entendimento acerca das fontes de energia: Renovável x Não Renovável.
O que é a Economia do Hidrogênio, baseada na descarbonização das fontes?
Duas das principais formas de produção de hidrogênio?
Quais são os grandes gargalos associados ao combustível hidrogênio para a sua popularização energética?
Quais as principais formas de armazenamento de hidrogênio?
Qual foi o grande motivador para o desenvolvimento de células a combustível, tendo em vista as relações entre Eficiência x Faixa de Potência e também o preço x potência?
Definição de célula a combustível.
Quais as possíveis aplicações das células a combustível?
Quais os principais tipos de células a combustível, suas vantagens e desvantagens?
Qual é o princípio de funcionamento de uma célula a combustível do tipo PEM?
Quais os principais gargalos para a popularização em larga escala das células a combustível do tipo PEM?
Descrição da curva de polarização típica de uma CaC.

Mapa da Mina

DIRETORIA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA
IEC • PREPES PUC Minas

A **Questão Energética**.

O **Hidrogênio (e tecnologias)** é o **futuro** da energia.

Todos os **cenários futuros** o contemplam.

Hidrogênio como motor para a **Rev. Energética**.

Não é uma fonte, o hidrogênio é um **vetor energético**.

Contextualiza-se na **redução de emissão** e redução da **dependência** de combustíveis fósseis.

Alinhado com as tecnologias para **GD, SG e SC**.

Veículo elétrico como grande vetor

Compõe as tecnologias de **armazenamento**.

Principais formas de Produção: **Reforma** e **Eletrólise**.

H_2 futuro: **solar, eólica e nuclear** (G IV). Tem forma exóticas também.

Questões de: **Segurança, Normas, Custos, Desempenho**

Armazenamento: **gasoso, líquido, hidretos metálicos**.

Transporte: **caminhão, trem, tubulação**.

Logística: **centralizada e descentralizada, múltiplas opções de configuração**.

Célula a combustível: **eletroquímica que produz calor e eletricidade**.

Aplicações: pequeno, médio e grande porte, além de veicular.

Nomenclatura: **CaC**. Mais conhecido pelo tipo de eletrólito, mas tem outras...

AFC, PEMFC, PAFC, MCFC, SOFC, Zn/Ar, Biológica.

Máximo potencial (PEM): 1,229 V, Eficiência: 83% (dG/dH). T e P alteram esses valores.

Maior eficiência em baixas temperatura.

Aspectos das partes: Eletrodos, catodo e anodo.